Régionalisation climatique : de la donnée aux impacts du changement

Thierry Castel

▶ **To cite this version:**

Thierry Castel. Régionalisation climatique : de la donnée aux impacts du changement. Climatologie. Université Bourgogne Franche-Comté, 2023. tel-04121861

HAL Id: tel-04121861

https://institut-agro-dijon.hal.science/tel-04121861

Submitted on 8 Jun 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UBFC
UNIVERSITÉ
BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ

ÉCOLE DOCTORALE
PRES I Bourgogne I Franche-Comté
Environnements - Santé

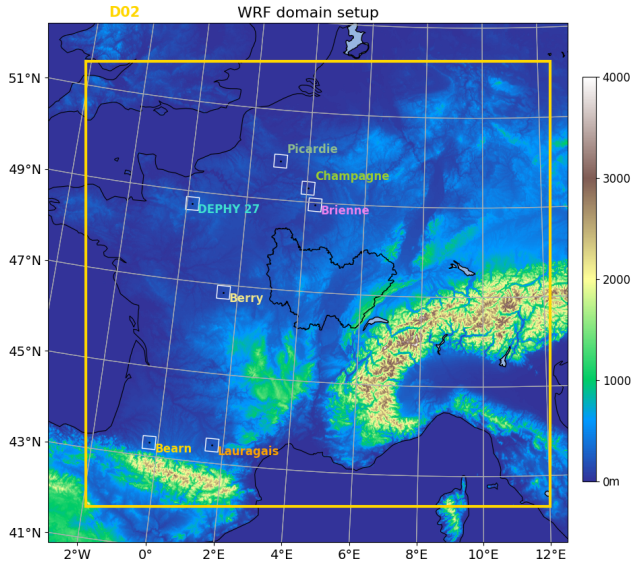
École doctorale n° 554 : Environnements-Santé

Université Bourgogne Franche-Comté

Habilitation à Diriger des Recherches

Spécialité "Climatologie"

Régionalisation climatique : de la donnée aux impacts du changement



présentée et soutenue publiquement par

Thierry Castel

le 31/05/2023

Jury

M.,	Julien Boé – Directeur de Recherche CNRS	Rapporteur
M.,	Vincent Dubreuil – Professeur Univ. Rennes 2	Rapporteur
M.,	Nicolas Viovy – Directeur de Recherhce CEA	Rapporteur
Mme,	Nathalie Bréda – Directrice de Recherche INRAE	Examinatrice
M.,	Yves Richard – Professeur Univ. Bourgogne	Examinateur

UMR 6282 Biogéosciences CNRS/Université de Bourgogne
Centre de Recherches de Climatologie (CRC)
21000 Dijon, France

HDR

Table des matières

1 Introduction **2**
- 1.1 Avertissement . . . 3
- 1.2 Éléments de contexte et de motivation . . . 3
- 1.3 Enjeux et objet de la régionalisation climatique . . . 4
- 1.4 Démarche et questionnements . . . 5

2 Crédibilité de la régionalisation climatique dynamique **9**
- 2.1 Cadre et problématique des travaux . . . 10
- 2.2 Reproduction de la variabilité régionale : cas des précipitations . . . 12
- 2.3 Évaluation de la donnée climatique : calcul de bilan hydrique . . . 13
- 2.4 Amélioration de la qualité des données régionalisées : pistes explorées . . . 15

3 Réchauffement climatique : portrait et impacts régionalisés **22**
- 3.1 Cadre et problématique des travaux . . . 23
- 3.2 Portrait du réchauffement climatique régional . . . 24
- 3.3 Impacts régionalisés : risque gélif hivernal . . . 26
- 3.4 Perceptions du réchauffement climatique . . . 30

4 Modifications de la variabilité climatique régionale **36**
- 4.1 Cadre et problématique des travaux . . . 37
- 4.2 Qualité de la régionalisation des CCSM4-CMIP5 débiaisées . . . 39
- 4.3 Projection régionalisée du stress gel . . . 40
- 4.4 Nouvelle stratégie de régionalisation : piste envisagée . . . 41

5 Réflexions et perspectives **45**

A Curriculum Vitae **I**
- A.1 État civil . . . I
- A.2 Diplômes . . . I
- A.3 Langues étrangères . . . I
- A.4 Distinctions . . . I
- A.5 Cursus professionnel . . . II
- A.6 Formation complémentaires suivies . . . III

B Encadrements de la recherche **V**
- B.1 Thèses de doctorat . . . V
- B.2 Post-doctorats, ingénieurs . . . VI
- B.3 Masters . . . VII

C Projets de recherche **IX**

D Prestations de services et expertises **X**

E Liste des travaux **XII**

Liste des figures

1.1 Schéma conceptuel de l'articulation entre les données climatiques régionales simulées par le modèle ARW/WRF, les modèles de stress gel et de culture du pois d'hiver. Azodyn-Pea est un modèle de culture du pois (Jeuffroy et al. 2012). 6

2.1 Protocole de downscaling dynamique avec le modèle WRF, a) emboîtement de trois domaines (LD : Large Domain, MD : Medium Domain, SD : Small Domain) centrés sur le centre-est/nord-est de la France, b) topographie du domaine d'étude (D) couvrant l'ex région Bourgogne. Les points indiquent la localisation des 127 stations de mesures utilisées pour évaluer les simulations climatiques (d'après Marteau et al. (2015)). 11

2.2 Cartes du cumul annuel moyen a) des précipitationss observées par le réseau de stations de Météo-France et interpolées sur la maille du modèle par la méthode de Régression-Krigeage, b) des précipitations simulées par le modèle WRF et c) le biais correspond à la différence entre la carte (b) soustraite de la carte (a) d'après Marteau et al. (2015). 13

2.3 Localisation des parcelles de pins Douglas (droite) et de hêtres (gauche) sur lesquelles le modèle de bilan hydrique a été calibré, validé et appliqué. La couleur de fond correspond à la topographie telle que représentée par WRF dans la grille du troisième domaine. Les étoiles oranges et les cercles jaunes symbolisent les mailles SIM et WRF les plus proches des parcelles forestières, d'après Boulard et al. (2017). 14

2.4 Cycle annuel moyen (période 1989-2008, calculé pour les 30 parcelles) de la réserve en eau relative (REW) calculée à partir de WRF (courbe jaune), SIM (courbe orange), stations Météo-France (courbe rouge) et WRF avec les précipitations des stations (courbe noire), d'après Boulard et al. (2016). 15

2.5 Chronologie des précipitations journalières (en mm) simulées par WRF après post-correction (jaune) et SIM (orange), moyennées sur l'ensemble de la Bourgogne a) en 1990 et b) en 1996, d'après Boulard (2016). 16

2.6 Cumul annuel moyen des précipitations observées (Obs) et simulées (ERAINT/WRF) sur la région Bourgogne Franche-Comté. Les traits pointillés indiquent la séparation en précipitations convectives et non-convectives. 18

3.1 Évolution des anomalies des températures minimales (Tmin) et maximales (Tmax) sur la période 1961-2013. Les anomalies sont calculées par rapport à la normale 1961-1990 et pour 128 stations réparties sur la France métropolitaine. Les traits pleins bleu (Tmin) et rouge (Tmax) correspondent à la méthode fréquentiste de partition linéaire. Les traits pointillés gris clair et gris foncé représentent la moyenne calculée a posteriori par la méthode bayesienne. Le graphique du bas indique, par les traits verticaux bleu et rouge (qui sont ici superposés), l'année où un changement abrupt est détecté par la méthode de partition linéaire. Le trait noir continu représente la probabilité a posteriori d'avoir pour une année donnée un changement abrupt. Cette probabilité est maximale en 1987, d'après Brulebois et al. (2015). 25

3.2 Évolution des anomalies des températures minimales (Tmin) et maximales (Tmax) sur la période 1880-2000. Les anomalies sont calculées par rapport à la normale 1961-1990 et pour quelques stations en France. Pour le reste se référer à la figure 3.1 26

3.3 La simulation porte sur une variété de pois avec une R_{max} de $-13°C$, une vitesse d'acclimatation de 42 jours, et un semis (sowing) le 10 octobre 2011. La simulation est réalisée pour les conditions climatiques de Bretenière (21) durant l'hiver 2011/2012. La courbe continue bleue représente l'évolution journalière des températures minimales. Les courbes vertes (continu et tireté) représentent respectivement les résistances maximale R_{max} et effective R_j du pois. Cette dernière peut être vue comme le niveau de vulnérabilité du pois. La courbe continue rouge indique le niveau du stress gel. Le pois est considéré en stress gel à chaque fois que la courbe bleue croise la courbe verte continue. La surface rouge correspond au stress gel cumulé exprimé en degré-jours. Il a été montré que les dégâts gélifs observés sont proportionnels à cette valeur cumulée, d'après T. Castel et al. (2019). 28

3.4 Boites à moustaches de l'évolution moyenne du nombre d'événements gélifs entre les deux périodes et pour les R_{max} de $-13°C$ (couleur verte) et $-23°C$ (couleur cyan). L'encart présente l'évolution de l'intensité moyenne d'un événement. Ces variables ont été inférées à partir des distributions de Tweedie ajustées, d'après T. Castel et al. (2019). 30

4.1 Cycle annuel moyen calculée pour la période 1980-2005 et pour les trois jeux de données SIM (Observées – trait vert), ERA/WRF (simulées – trait bleu) et CCSM4/WRF (simulées – trait cyan). La moyenne est calculée à partir de l'ensemble des points de la grille (8km) qui couvre la région Bourgogne Franche-Comté. 39

4.2 Indice de stress calculé par le modèle BILJOU© pour les 30 parcelles de pins Douglas. Pour chaque parcelle les données climatiques sont fournies par le point de grille le plus proche. Les données climatiques utilisées pour forcer le modèle BILJOU© sont : SIM (i.e. SAFRAN – fuchsia dont les données marquent les limites en pointillées du premier et du troisième quartile de l'indice de stress), ERAINT/WRF (vert) et CCSM4/WRF (rouge). Notons que pour ces deux derniers jeux de données une post-correction par quantile-mapping a été appliquée sur les précipitations et les températures (bleu et vert olive), d'après Blanchet et al. (2022) 40

4.3 Evolution du stress gel hivernal (frost stress) du pois en Bourgogne Franche-Comté pour deux températures de résistance maximale R_{max} (-13°C et -23°C). Les simulations correspondent à plusieurs dates de semis (2, 10, 21 et 31 octobre) et plusieurs durées d'acclimatation (35 à 49 jours par pas de 2 jours). Le stress gel hivernal est évalué pour chaque hiver par la somme des différences entre la température de résistance effective journalière de la culture calculée par le modèle et la température minimale quand celle-ci est inférieure à la résistance. Évolution moyenne (en trait plein) et enveloppes des simulations réalisées en utilisant les données observées et les données simulées, d'après Ubertosi et al. (2022). 41

Liste des tableaux

A.1 Titres et diplômes I
A.2 Formations suivies III

B.1 Thèses co-dirigées ou co-encadrées V
B.2 Encadrement de post-doctorant(e)s et ingénieurs VI
B.3 Mémoires encadrés ou co-encadrés du niveau Master 2 VII

C.1 Projets, programmes de recherches et responsabilités IX

D.1 Concours de recrutement ingénieurs XI

Chapitre 1

Introduction

■ *Je plaide pour une renaissance des pratiques ascétiques, pour maintenir vivants nos sens, dans les terres dévastées par le "show", au milieu des informations écrasantes, des conseils à perpétuité, du diagnostic intensif, de la gestion thérapeutique, de l'invasion des conseillers, des soins terminaux, de la vitesse qui coupe le souffle* ■

Ivan Illich, la perte des sens, ed. Fayard, 2004

Sommaire

1.1 Avertissement 3
1.2 Éléments de contexte et de motivation 3
1.3 Enjeux et objet de la régionalisation climatique 4
1.4 Démarche et questionnements 5

1.1 Avertissement

Ce document ne fait ni un état de l'art ni une synthèse bibliographique exhaustive de la climatologie, de la régionalisation climatique et des effets des changements climatiques. Ces domaines sont trop vastes et divers. De plus, une telle entreprise sortirait me semble t-il des attendus et d'une dimension raisonnable pour ce document. Beaucoup des travaux essentiels ne sont donc pas cités dans ce document même s'ils ont contribué à élaborer le corpus de connaissances sur lequel je me suis grandement appuyé pour mes travaux. Le présent document peut donc être lu comme un composite de travaux de recherche effectués dans les domaines précités, de travaux en cours, et peut-être plus important d'une posture réflexive sur la démarche scientifique. Les articles, les ouvrages et les liens qui y sont référencés permettront je l'espère de remonter le fil de ce vaste domaine de recherche qu'est la climatologie au sens large. Ne cherchant aucunement à me dédouaner, j'ai bien conscience des regrets des auteurs oubliés et de la frustration des lecteurs et lectrices en recherche d'une information particulière ou d'une synthèse aboutie. Que ces personnes veuillent bien accepter mes excuses.

1.2 Éléments de contexte et de motivation

Comme le laisse transparaître mon parcours professionnel, mes premiers travaux de recherche n'ont été que très indirectement reliés au climat et aux changements climatiques. Les données des radars à synthèse d'ouverture aéro- et spatio-portées ont suscité au cours de la décennie 1990 un engouement quant à leur capacité par tout temps de jour comme de nuit à estimer les propriétés et le suivi des couverts végétaux (Dobson et al. 1992 ; Le Toan et al. 1992). Une des concrétisations majeures est le prochain lancement du satellite Biomass par l'agence spatiale européenne (Scipal et al. 2010). Ce satellite vient compléter et étendre la panoplie des systèmes d'observation de la terre par sa capacité à estimer la biomasse végétale aérienne et évaluer les stocks de carbone. Ces stocks et leurs évolutions sont entachés de fortes incertitudes (Houghton 2003). Or, ils font partie avec l'océan des deux principaux puits de carbone qui contribuent à réguler la concentration du CO_2 le principal gaz à effet de serre (Le Quéré et al. 2009). En travaillant sur l'évaluation du contenu informatif et la restauration de données de télédétection radar à synthèse d'ouverture, j'ai implicitement interrogé la crédibilité et l'applicabilité de ces données pour estimer la ressource forestière (i.e. biomasse aérienne) aux échelles régionales et locales (Castel 1998). D'une certaine manière, en réorientant mes travaux sur la régionalisation climatique au cours de ma reconversion thématique j'ai poursuivi dans cette veine.

Composante majeure de l'environnement – avec l'hydrosphère, la biosphère et la lithosphère – l'atmosphère est le compartiment au sein duquel nos sociétés se sont pleinement développées pour le meilleur et pour le pire. Tant et si bien que la bascule industrielle, qui s'est opérée au cours du XIX^{e} siècle, a marqué l'avènement d'une nouvelle ère, l'anthropocène [1](Fressoz et Bonneuil 2016). Par notre recours massif aux énergies fossiles nous avons et continuons à accroître la concentration de plusieurs gaz à l'état traces (dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote) qui jouent un rôle décisif dans l'équilibre énergétique de l'atmosphère et au delà du système climatique. Ce système est un objet fascinant qui nous est à la fois familier et étranger. Familier par les cycles récurrents et immuables qui marquent les saisons ou la géographie des températures et des précipitations. Étranger par la variabilité haute fréquence d'essence chaotique qui brouille notre perception du climat au profit de la météo. Cette superposition d'une multitude de modes de variabilité tant dans le temps que dans l'espace recouvre une redoutable complexité. Apprivoiser cette complexité afin de dégager les principaux traits de l'état moyen de l'atmosphère, de rechercher les causes et les processus de ses évolutions à différentes échelles spatio-temporelles est l'objet principal de la climatologie : la science des climats (Acot 2003).

1. Terme forgé par Paul Crutzen prix Nobel de chimie en 1995

Les climats peuvent être vus comme un des traits d'union entre les différentes composantes de l'environnement. Qu'il soit d'origine naturelle ou forcée, leur dérèglement a des effets directs et indirects sur toutes ces composantes. Le renforcement de l'effet de serre affecte la dynamique (e.g. la circulation atmosphérique) et la thermodynamique (e.g. la température) de l'atmosphère. Cela a pour effet de modifier les forçages sur l'hydrosphère, la biosphère et la lithosphère qui en retour vont modifier les forçages de l'atmosphère. Cette notion de rétroaction et des processus qui y sont impliqués renvoie au système climatique qui est d'échelle globale. L'étude des climats s'inscrit dans des approches d'échelles régionales à locales et c'est à ce niveau que j'ai positionné mes travaux de recherche lors de mon association avec le CRC [2].

La curiosité est depuis toujours le moteur de ma recherche. Les questions qui relèvent du domaine de l'environnement font partie de mes principales motivations à documenter, analyser et expliquer la variabilité climatique à l'échelle des territoires. Les patrons de cette variabilité sont des déterminants forts du fonctionnement des agro-, sylvo- et hydro-systèmes. L'idée que la variabilité naturelle du climat d'un territoire donné, fluctue à l'intérieur d'une enveloppe et autour d'une moyenne stable est remise en cause avec le réchauffement climatique. En particulier pour la gestion de l'eau, certains auteurs ont déclaré que la stationnarité était morte (Milly et al. 2008). Comme conséquence, se fier aux statistiques du passé ne sera plus un guide utile pour l'avenir (Lettenmaier et al. 2009). L'utilisation de modèles climatiques pour fournir des informations qui peuvent aider à évaluer des réponses alternatives au changement climatique est une des voies suivies pour ce processus d'évaluation. Dans ce cas, l'idée est d'utiliser les modèles climatiques pour analyser/expliquer les modifications projetées de la variabilité climatique de surface, identifier les impacts, et au delà les vulnérabilités potentielles des stratégies d'adaptation proposées à l'échelle des territoires. Cette ambition nécessite *i*) de mimer correctement le climat tel qu'il s'est exprimé et *ii*) d'élaborer des représentations crédibles du climat futur.

Ce sont ces deux bouts que j'essaie de tenir dans la cadre de ma recherche, produire une donnée climatique régionale de qualité, utile à la fois, pour contribuer à expliquer la variabilité climatique et pour documenter les impacts en environnement changeant.

1.3 Enjeux et objet de la régionalisation climatique

La variabilité climatique a toujours fait l'objet d'une attention particulière de la part des sociétés humaines. Cela s'est traduit tout d'abord par des observations localisées dont la systématisation et la normalisation sont intervenues au cours du XIX^{e} siècle. Avec l'avènement, dans la deuxième partie du XX^{e} siècle, des technologies du numérique dédiées au calcul (e.g. super calculateur) et à l'observation (e.g. radar, imagerie satellite), les capacités de prévision météorologique comme celles d'analyse et de simulation climatique ont subit un formidable développement. Cela se traduit aujourd'hui par une capacité à prévoir, avec une précision inégalée, les configurations porteuses de la variabilité haute fréquence (de l'heure à une dizaine de jours) de l'atmosphère sur des espaces restreints (du km^2 à quelques dizaines de km^2). Parallèlement, les données combinées aux modèles numériques de prévisions ont permis, après adaptation, à l'échelle du globe et à des résolutions de plus en plus fines de *i*) reproduire les principaux traits (e.g. El Niño, NAO [3]) du climat, *ii*) mimer la variabilité qui s'est exprimée dans le passé récent et l'actuel et *iii*) projeter les climats possibles jusqu'au XXIII^{e} siècle selon différentes configurations de forçage radiatif. Ces progrès et les succès qui y sont attachés ne doivent pas masquer l'irréductibilité des incertitudes, les nombreux verrous et les 'angles morts' qui persistent dans la compréhension des processus, l'identification des déterminants et l'évaluation des impacts de la variabilité. A méso-échelle – i.e. résolutions allant de quelques dizaines à quelques milliers de km^2 – des incertitudes et des biais majeurs persistent sur

2. Centre de Recherches de Climatologie – UMR 6282 Biogéosciences CNRS/Univ. Bourgogne
3. North Atlantic Oscillation

l'estimation régionalisée des variables climatiques de surface (e.g. température, précipitations, vent, humidité, rayonnement). C'est pourtant à ces échelles spatiales intermédiaires et pour des pas de temps allant de l'inter-annuel au journalier voire à l'infra-journalier que la question de l'analyse de la variabilité climatique de surface revêt un intérêt certain.

La régionalisation s'appuie sur le concept de descente d'échelle (Giorgi 2006). Cette descente d'échelle – également appelée downscaling – peut s'opérer soit statistiquement, soit dynamiquement (Maraun et Widmann 2018). Mon travail s'est principalement centré sur la mise en oeuvre d'une approche dynamique qui fait appel à un modèle climatique régional (MCR) qui s'est doublé de l'utilisation de méthodes de débiaisage statistique (Boulard et al. 2017). Notons que ces méthodes sont également mobilisées pour le downscaling statistique (Boé et al. 2007). Ces modèles implémentent l'état de l'art de la dynamique et de la physique du climat et servent également pour tester de nouveaux schémas de convection, de micro-physique des nuages ou encore de modélisation des surfaces continentales (Dudhia 2014 ; Rummukainen 2010).

L'objet de la régionalisation consiste à produire à l'intérieur d'un domaine géographique circonscrit un climat sur une grille dont la résolution est généralement inférieure à 30km. La valeur ajoutée d'un MCR à proposer une géographie des champs climatiques adaptés aux territoires est indéniable. Mais les 'angles morts' et les verrous majeurs persistent. Les biais systématiques sur les températures qui se doublent pour les précipitations de mauvaises reproductions du cycle annuel en sont des exemples. Ces biais interrogent la crédibilité du downscaling dynamique et au delà des modèles régionaux, et posent clairement la question "*How good is good enough ?*"[4]. Cette question peut apparaître surprenante au premier abord mais elle doit être mise en regard des questions auxquelles on cherche à répondre. Ces modèles ont démontré leur utilité pour l'étude des climats régionaux et l'analyse de leurs interactions avec d'autres composantes de l'environnement. Cela en fait les approches privilégiées pour par exemple, l'initiative internationale CORDEX (Jacob et al. 2020). Avec l'objectif d'évaluer les impacts du changement climatique, les données régionalisées vont servir à forcer des modèles d'impact[5] de manière descendante et univoque. Le niveau de précision requis pour évaluer les impacts, nécessitant le pas de temps journalier, fait apparaître les faiblesses de ces approches en particulier pour reproduire la géographie, le volume et le cycle des précipitations. Au delà de l'évaluation des impacts – qui est un point essentiel pour penser les transitions sans regret de la société et des territoires – cette articulation peut être utile pour adresser deux autres points. Les premiers, comme suggéré par Stéfanon et al. (2015), pour tester avec un niveau d'exigence spécifique les modèles climatiques régionaux (i.e. leur crédibilité). Le deuxième, pour inférer à partir des résultats de cette articulation les modifications fines et subtiles de la variabilité que des approches mathématiques/statistiques appliquées directement sur les données climatiques ne peuvent capter. Ce deuxième point fait l'hypothèse que les métriques d'impact intègrent un large spectre de signaux climatiques qui sont une source additionnelle et complémentaire pour évaluer les patterns de la variabilité climatique actuelle et projetée.

1.4 Démarche et questionnements

Dans ce texte, je prends comme exemple l'articulation entre données climatiques régionales et les deux modèles d'impact que sont le modèle de bilan hydrique sous couvert forestier BILJOU© (Granier et al. 1999) et le modèle de stress gel du pois d'hiver (Lecomte et al. 2003). Outre que mes travaux ré-interrogent l'approche séquentielle de cette articulation au profit d'une approche 'cyclique' (figure 1.1), ils s'inscrivent pleinement dans le contexte du réchauffement climatique observé et projeté.

Cette figure 1.1 conceptualise la démarche récursive que j'essaie de déployer. Améliorer notre capacité à produire des données climatiques de qualité est l'objectif incontournable si

4. J'emprunte cette formule à Stéfanon et al. (2015)
5. Cette terminologie générique recouvre ici des modèles de stress gel, de bilan hydrique et hydrologique.

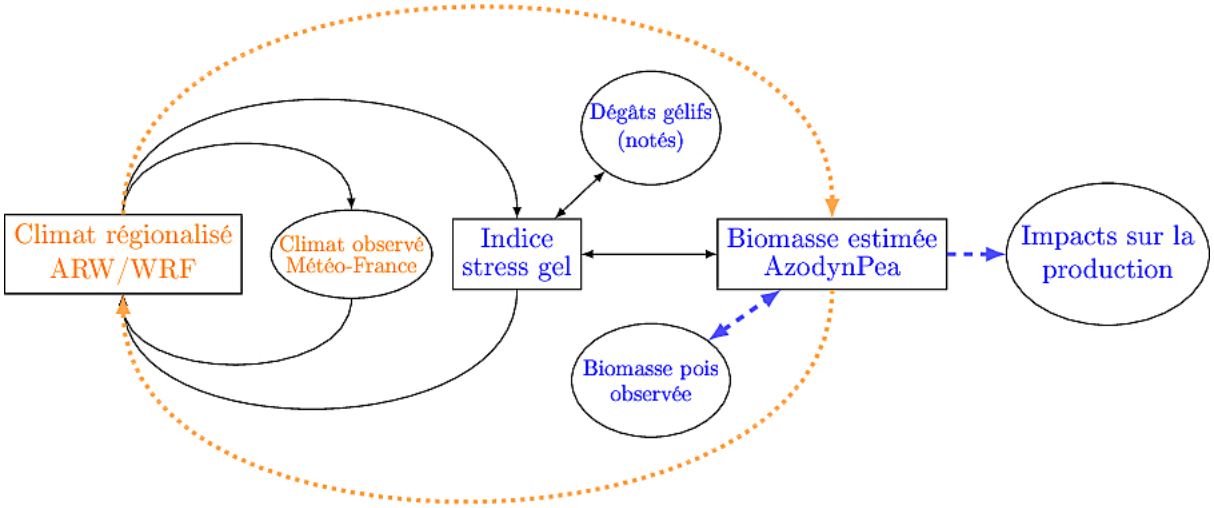


FIGURE 1.1 – Schéma conceptuel de l'articulation entre les données climatiques régionales simulées par le modèle ARW/WRF, les modèles de stress gel et de culture du pois d'hiver. Azodyn-Pea est un modèle de culture du pois (JEUFFROY et al. 2012).

l'on veut pouvoir brosser les patterns de la variabilité climatique territorialisée actuelle et future. Plusieurs niveaux d'évaluation sont ainsi proposés. La figure 1.1 illustre cela avec le modèle de stress gel et de culture du pois d'hiver, mais la démarche est similaire pour les autres champs que j'explore au travers de mes collaborations. La diversité des champs permet de produire différentes métriques d'impact dont la réponse au forçage climatique est spécifique. Ces spécificités peuvent nous aider à mieux cerner le portait du changement climatique selon une grille complémentaire à celle des approches classiques déployées en climatologie. L'estimation du risque et de son évolution est un des éléments de cette grille. Ce risque est une mesure indirecte de l'aléa climatique qui, croisé avec différentes vulnérabilités (e.g. stress gel, stress hydrique, production) peut permettre de révéler plus de subtilités. Il est attendu que cette variabilité soit modifiée avec la rupture de stationnarité évoquée plus haut. J'ai privilégié dans le cadre de mes travaux une analyse de ces modifications via les ruptures détectées sur la température de surface (BRULEBOIS et al. 2015 ; REID et al. 2016). Les différentes périodes d'une profondeur temporelle similaire de part et d'autre de la première rupture sont un cadre opportun pour déployer une approche statistique et probabiliste robuste pour quantifier l'évolution du risque et indirectement les modifications de la variabilité climatique. J'ai en priorité conduit mes activités de recherche sur le fuseau eurafricain avec un focus marqué sur la France et la région Bourgogne Franche-Comté.

Pour résumer, et dans ce cadre, mes travaux poursuivent les objectifs suivants : *i*) évaluer la crédibilité de la régionalisation dynamique du climat, *ii*) documenter les modalités du réchauffement actuel et projeté et ses conséquences régionalisées et *iii*) qualifier les modifications de la variabilité climatique au crible du couplage modèle climatique – modèle d'impact. La suite de ce mémoire s'organise autour de ce triptyque.

Références

ACOT, P. (2003). *Histoire du climat*. Perrin ed., p. 309.

BOÉ, J., L. TERRAY, F. HABETS et E. MARTIN (2007). "Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies". In : *International Journal of Climatology* 27.12, p. 1643-1655. ISSN : 08998418, 10970088. DOI : 10.1002/joc.1602. URL : http://doi.wiley.com/10.1002/joc.1602.

Boulard, D., T. Castel, P. Camberlin, A.-S. Sergent, D. Asse, N. Bréda, V. Badeau, A. Rossi et B. Pohl (2017). "Bias correction of dynamically downscaled precipitation to compute soil water deficit for explaining year-to-year variation of tree growth over northeastern France". In : *Agricultural and Forest Meteorology* 232, p. 247-264. ISSN : 0168-1923. DOI : https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.08.021. URL : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192316303768.

Brulebois, E., T. Castel, Y. Richard, C. Chateau-Smith et P. Amiotte-Suchet (2015). "Hydrological response to an abrupt shift in surface air temperature over France in 1987/88". In : *Journal of Hydrology* 531, p. 892-901. ISSN : 0022-1694. DOI : http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.026. URL : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415007945.

Castel, T. (1998). "Estimation de paramètres de la ressource forestière par télédétection radar à synthèse d'ouverture : apport du couplage d'un modèle architectural de plantes avec un modèle de diffusion électromagnetique". Thèse de doctorat. École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, 250p. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/tel-02152966.

Dobson, M.C., F.T. Ulaby, T. LeToan, A. Beaudoin, E.S. Kasischke et N. Christensen (1992). "Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass". In : *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 30.2. Conference Name: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, p. 412-415. ISSN : 1558-0644. DOI : 10.1109/36.134090.

Dudhia, J. (2014). "A history of mesoscale model development". In : *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 50.1, p. 121-131. ISSN : 1976-7951. DOI : 10.1007/s13143-014-0031-8. URL : https://doi.org/10.1007/s13143-014-0031-8.

Fressoz, J.-B. et C. Bonneuil (2016). *L'Evénement Anthropocène*. Seuil ed. URL : https://www.seuil.com/ouvrage/l-evenement-anthropocene-jean-baptiste-fressoz/9782021135008.

Giorgi, F. (2006). "Regional climate modeling: status and perspectices". In : *J. Phys.* 139, p. 101-118.

Granier, A., N. Bréda, P. Biron et S. Villette (151999). "A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands". In : *Ecological Modelling* 116.2, p. 269-283. ISSN : 0304-3800. DOI : 10.1016/S0304-3800(98)00205-1. URL : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304380098002051.

Houghton, R. A. (2003). "Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different?" In : *Global Change Biology* 9.4. _eprint: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1046/j.1365-2486.2003.00620.x, p. 500-509. ISSN : 1365-2486. DOI : 10.1046/j.1365-2486.2003.00620.x. URL : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1365-2486.2003.00620.x.

Jacob, D. et al. (2020). "Regional climate downscaling over Europe: perspectives from the EURO-CORDEX community". In : *Regional Environmental Change* 20.2, p. 51. ISSN : 1436-378X. DOI : 10.1007/s10113-020-01606-9. URL : https://doi.org/10.1007/s10113-020-01606-9.

Jeuffroy, M.-H., A. Vocanson, J. Roger-Estrade et J.-M. Meynard (2012). "The use of models at field and farm levels for the ex ante assessment of new pea genotypes". In : *European Journal of Agronomy*. Designing Crops for new challenges 42, p. 68-78. ISSN : 1161-0301. DOI : 10.1016/j.eja.2012.04.005. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030112000639.

Le Quéré, Corinne et al. (2009). "Trends in the sources and sinks of carbon dioxide". In : *Nature Geoscience* 2.12. Number: 12 Publisher: Nature Publishing Group, p. 831-836. ISSN : 1752-0908. DOI : 10.1038/ngeo689. URL : https://www.nature.com/articles/ngeo689.

Le Toan, T., A. Beaudoin, J. Riom et D. Guyon (1992). "Relating forest biomass to SAR data". In : *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 30.2. Conference Name: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, p. 403-411. ISSN : 1558-0644. DOI : 10.1109/36.134089.

Lecomte, C., A. Giraud et V. Aubert (2003). "Testing a predicting model for frost resistance of winter wheat under natural conditions". In : *Agronomie* 23.1, p. 51-66. DOI : 10.1051/agro:2002068. URL : https://doi.org/10.1051/agro:2002068.

Lettenmaier, D. P., E. F. Wood, R. Pielke, K. E. Trenberth, W. B Rossow et T. Oki (2009). "Water in a Changing Climate: Challenges for GEWEX". In : *Global Energy and Water Cycle Experiment News* 19.2, p. 1-16.

Maraun, D. et M. Widmann (2018). *Statistical Downscaling and Bias Correction for Climate Research*. Cambridge : Cambridge University Press. ISBN : 978-1-107-06605-2. DOI : 10.1017/9781107588783. URL : https://www.cambridge.org/core/books/statistical-downscaling-and-bias-correction-for-climate-research/4ED479BAA8309C7ECBE6136236E3960F.

Milly, P. C. D., Julio Betancourt, Malin Falkenmark, Robert M. Hirsch, Zbigniew W. Kundzewicz, Dennis P. Lettenmaier et Ronald J. Stouffer (2008). "Stationarity Is Dead: Whither Water Management?" In : *Science* 319.5863, p. 573-574. ISSN : 0036-8075, 1095-9203. DOI : 10.1126/science.1151915. URL : http://science.sciencemag.org/content/319/5863/573.

Reid, P. C. et al. (2016). "Global impacts of the 1980s regime shift". In : *Global Change Biology* 22.2, p. 682-703. ISSN : 1365-2486. DOI : 10.1111/gcb.13106. URL : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.13106.

Rummukainen, M. (2010). "State-of-the-art with regional climate models". In : *WIREs Climate Change* 1.1. _eprint: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/wcc.8, p. 82-96. ISSN : 1757-7799. DOI : 10.1002/wcc.8. URL : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wcc.8.

Scipal, K. et al. (2010). "The BIOMASS mission — An ESA Earth Explorer candidate to measure the BIOMASS of the earth's forests". In : *2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. ISSN: 2153-7003, p. 52-55. DOI : 10.1109/IGARSS.2010.5648979.

Stéfanon, M., N. K. Martin-StPaul, P. Leadley, S. Bastin, A. Dell'Aquila, P. Drobinski et C. Gallardo (2015). "Testing climate models using an impact model: what are the advantages?" In : *Climatic Change* 131.4, p. 649-661. ISSN : 1573-1480. DOI : 10.1007/s10584-015-1412-4. URL : https://doi.org/10.1007/s10584-015-1412-4.

Chapitre 2

Crédibilité de la régionalisation climatique dynamique

■ *Je ne suis ni pour, ni contre, bien au contraire.* ■

Coluche

Sommaire

2.1 Cadre et problématique des travaux 10
2.2 Reproduction de la variabilité régionale : cas des précipitations 12
2.3 Évaluation de la donnée climatique : calcul de bilan hydrique 13
2.4 Amélioration de la qualité des données régionalisées : pistes explorées . . . 15
2.4.1 Post-correction des biais des précipitations 15
2.4.2 Nouvelle configuration de régionalisation 17

2.1 Cadre et problématique des travaux

Dans la foulée de mon association avec le Centre de Recherches de Climatologie (CRC UMR 5210 CNRS/Univ. de Bourgogne) en 2005, j'ai demandé et obtenu avec le soutien de Bernard Fontaine (directeur de l'unité) et de l'ensemble de l'équipe, une délégation CNRS de deux ans (section 12, 2005–2007). Historiquement, le CRC était fortement centré sur la climatologie tropicale et australe africaine. Quelques travaux étaient conduits à la marge en région Bourgogne. Ma délégation m'a permis de réaliser ma réconversion thématique avec au départ la double idée d'implanter un modèle climatique régional et de le mettre en oeuvre sur la France et la région Bourgogne Franche-Comté. L'intérêt de cette modélisation régionale ouvrait des perspectives potentiellement intéressantes pour l'étude des climats. Je me suis engagé dans cette voie pour contribuer au développement de ces approches au sein du CRC. Parallèlement, et au cours de la même période, deux éléments ont conforté cet engagement. Tout d'abord, S. Sijikumar (post-doctorant au CRC de 2005 à 2007) mettait en oeuvre le modèle climatique MM5 [1] sur l'Afrique de l'ouest (Sijikumar et al. 2006). Ensuite, mon collègue Yves Richard venait d'initier des travaux sur la modélisation et la spatialisation de la qualité de l'air à l'échelle de la Bourgogne. Il m'a ainsi proposé la co-direction de la thèse de Marie-Laure Houzé (Houzé 2006).

J'ai décidé, suite à de nombreux échanges avec S. Sijikumar, et au regard de ses travaux, d'utiliser le modèle régional WRF [2] (Skamarock et al. 2021) 'successeur' du modèle MM5. Le modèle WRF est largement diffusé, moins compliqué techniquement à mettre en oeuvre que d'autres modèles similaires et bénéficiant d'une large communauté. De plus, il implémente l'état de l'art de la modélisation climatique régionale et offre un large éventail de schémas physiques. Cette diversité de choix conduit à un potentiel de plusieurs dizaines de milliers de configurations. Suivant le point de vue où l'on se place et les objectifs poursuivis, cette diversité peut être envisagée comme un avantage ou un inconvénient. Outre un temps d'acculturation, mes premiers travaux effectifs ont été techniques et méthodologiques afin d'implanter le modèle sur le Centre de Calcul de l'Université Bourgogne (CCUB) et de désigner les modalités de la descente d'échelle. J'ai conduit ce travail 'ingrat' et fastidieux avec le support précieux des membres [3] du CCUB. Tout en essayant de ne pas m'y 'noyer', j'ai conduit une étude de sensibilité pour identifier les paramétrisations du modèle les plus performantes pour reproduire les principaux traits du climat de la région (Castel et al. 2010). Cette première étape s'est inscrite dans un processus itératif dont nos retours d'expériences, les résultats issus de la littérature et les avancées successives de la modélisation implémentée dans WRF ont guidé mes travaux.

Une des hypothèses sous-jacentes de la descente d'échelle indépendamment des contraintes techniques (temps calcul, volumétrie des données produites, saut d'échelle entre domaines) est qu'elle conduit, avec un grain de simulation de plus en plus fin, à un climat simulé plus réaliste (Rummukainen 2016). Cette amélioration est principalement attribuée à une meilleure prise en compte de la surface continentale (relief, occupation du sol, trait de côte, couverture neigeuse, aire urbaine, plan d'eau etc.) et par une meilleure reproduction de certains phénomènes de méso-échelle comme les cyclones, les dépressions polaires ou les îlots de chaleur urbains (Di Luca et al. 2012 ; Feser et al. 2011). La valeur ajoutée au sens de la modélisation climatique consiste principalement à mesurer l'amélioration des performances par rapport aux modèles globaux. Elle peut ainsi s'aborder selon différentes perspectives : reproduction des variables climatiques (e.g. température, précipitation, vent, humidité), projections régionales du changement climatique ou service pour les utilisateurs.

Même si pour ces trois critères un modèle régional performe mieux qu'un modèle global,

1. Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model
2. Advanced Research Weather Reasearch and Forecasting, dénommé WRF dans la pratique
3. J'ai au départ bénéficié de l'appui de Jean-Christophe Baisaille et de Jean-Jacques Gaillard auxquels Antoine Migeon et Didier Reibex se sont substitués.

rien ne garantie que cela soit suffisant. C'est ce que l'on cherche à faire avec la donnée, la nature de la question adressée ou encore la présence et l'amplitude des biais systématiques qui vont définir l'utilité du downscaling dynamique (Glotter et al. 2014). L'évaluation de la valeur ajoutée de la régionalisation climatique dynamique est conduite soit comparativement à des données globales climatiques (réanalysées, projetées) ou des données d'observation sur des pluies extrêmes ou des vagues de chaleurs. De nombreux travaux conduits depuis plusieurs années tendent à démontrer l'intérêt pour l'étude du climat, des processus et de la variabilité (Castro et al. 2005 ; Di Luca et al. 2012 ; Fumière et al. 2020 ; Gibba et al. 2019). La notion de crédibilité se réfère plus à la capacité des données régionalisées à répondre/atteindre un standard de qualité simultanément à l'intérieur et hors du champs de la climatologie. Dans ce cas, il est nécessaire que les simulations miment le plus fidèlement possible les données climatiques observées. Cela est nécessaire mais ne garantie pas obligatoirement que le niveau de réalisme, même validé statistiquement, soit suffisant. La précision requise par exemple par les modèles d'impact nécessite de produire les températures, les précipitations ou d'autres variables climatiques de surface (e.g. vent, humidité, rayonnement) au bon endroit, avec la bonne quantité et au bon moment, et ce avec le grain temporel et spatial le plus fin possible. Résoudre cette équation pour les modèles climatiques est un challenge extrêmement ambitieux. Outre l'intérêt certain pour brosser le panorama le plus large possible des impacts, ce niveau d'exigence ne peut être que profitable pour dessiner le portrait le plus réaliste possible de la variabilité climatique en contexte de changement. La climatologie peut-elle en faire l'économie et surtout est-elle en capacité d'atteindre cet objectif eu égard à la complexité du système climatique ? Vaste question s'il en est.

Mon travail de recherche se situe dans cette perspective pour évaluer la crédibilité de la régionalisation climatique que j'ai conduite selon les trois étapes suivantes :

— reproduction de la variabilité régionale (Klein 2011 ; Marteau et al. 2015) ;
— évaluation de la donnée climatique désagrégée (Boulard et al. 2016) ;
— amélioration de la donnée climatique régionalisée (Blanchet et al. 2022 ; Boulard et al. 2017).

L'essentiel de mes travaux consacrés à cet axe de recherche a été principalement réalisé sur le quart nord-est de la France (figure 2.1).

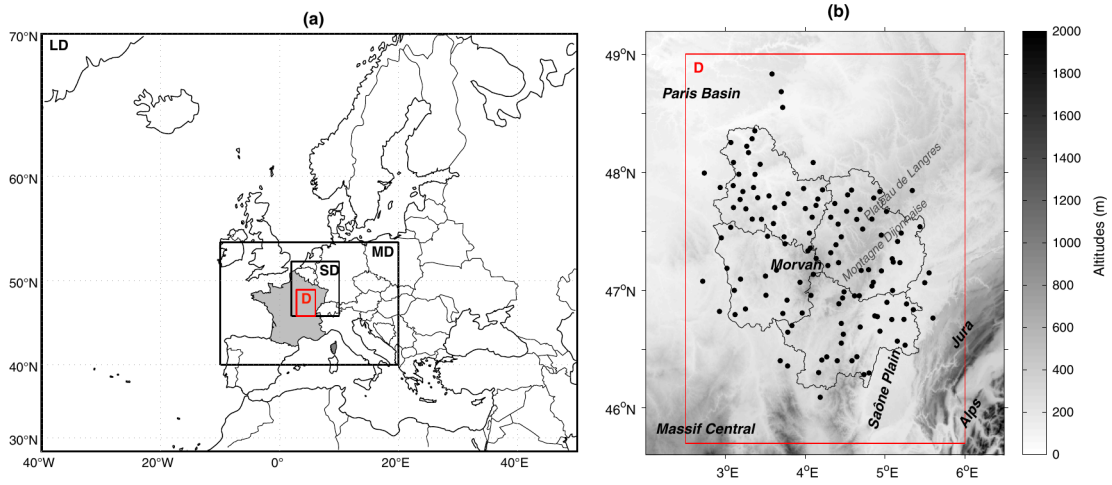


Figure 2.1 – Protocole de downscaling dynamique avec le modèle WRF, a) emboîtement de trois domaines (LD : Large Domain, MD : Medium Domain, SD : Small Domain) centrés sur le centre-est/nord-est de la France, b) topographie du domaine d'étude (D) couvrant l'ex région Bourgogne. Les points indiquent la localisation des 127 stations de mesures utilisées pour évaluer les simulations climatiques (d'après Marteau et al. (2015)).

Le réalisme des précipitations dans un modèle climatique est un indicateur clé de sa capacité à représenter les processus physiques sous-jacents et, par conséquent, à prévoir les

changements futurs des précipitations et au delà du climat. C'est sur cette variable que se sont concentrés nos efforts. La pluie, et les mécanismes qui y sont attachés, fait partie des éléments du climat les plus difficiles à reproduire. Cette variable obéit en effet à des processus multiscalaires et de nature convective ou non-convective.

2.2 Reproduction de la variabilité régionale : cas des précipitations

Le design de la descente d'échelle utilisé pour cette partie du travail a tout d'abord fait l'objet de deux stages de Master 2 GéoBiosphère (actuel master SEME [4]) dont un a été co-encadré avec Malika Madelin (Bonnefoy 2008 ; Legat 2007). Il s'agissait des premières simulations WRF centrées sur la Bourgogne (figure 2.1) avec la résolution cible de 3km. La descente d'échelle s'appuyait sur l'emboîtement de 4 domaines et nous faisions l'hypothèse que plus fine serait la maille de résolution plus réaliste serait le climat simulé. Les résultats ont montré qu'il n'y avait pas d'amélioration significative entre les résolutions 9km et 3km. Il y a une persistance de biais froid/chaud similaires sur les températures maximales et minimales pour ces deux résolutions et un effet d'échelle (stations *vs.* maille) dans la comparaison entre données observées et simulées. Nous n'avons pas conformément à d'autres travaux (Chan et al. 2013 ; Mass et al. 2012) trouvé d'éléments clairs montrant que la simulation à 3km est supérieure à celle de 9 km. Par contre une résolution de 1,5 km améliore la durée et l'extension spatiale des pluies intenses tout en réduisant la persistance de faible précipitation et les erreurs sur le cycle diurne comparativement à une résolution de 12km (Kendon et al. 2012).

En m'appuyant sur ce premier retour d'expérience et dans le cadre du post-doctorat de Ywen Xu (2008-2010 Financement région Bourgogne puis CNRS), nous avons redéfini le protocole en utilisant 3 domaines emboîtés avec la résolution cible de 8km. Cette nouvelle configuration avait comme double avantage de réduire à la fois le temps calcul et la volumétrie des données produites et d'envisager des simulations continues sur plusieurs dizaines d'années (Xu et al. 2012). C'est ce protocole que nous avons mobilisé pour analyser la variabilité des pluies. Ce travail s'inscrit dans la première boucle de la figure (1.1). Il a été conduit dans le cadre du post-doctorat de 6 mois de Romain Marteau en 2011. Outre la protocole de descente d'échelle, nous avons utilisé les mêmes schémas physiques, excepté pour la micro-physique.

Les simulations ont été conduites sur la période 1989-2009 avec un forçage toutes les 6h par les données des réanalyses ERAINTERIM de résolution 130km (Dee et al. 2011). Ces travaux ont montré que les 'runs' longs, continus et sans l'application d'un guidage large échelle ne faisaient pas l'objet d'une dérive. Avec une bonne reproduction de la variabilité inter-annuelle des précipitations, nos résultats ont montré que leur géographie était très bien reproduite (figure 2.2). Comparativement aux données de réanalyses qui globalement sous-estiment les cumuls, une sur-estimation systématique est observée sur les cumuls annuels et quasi-systématiques et non-homogènes à l'échelle du cycle annuel moyen. L'analyse fine a permis d'identifier le degré de confiance qualitatif que nous pouvions accorder à la simulation régionale avec un score systématiquement plus élevé pour les précipitations non-convectives. A 8km de résolution la convection est modélisée par un schéma de résolution sous maille. Le schéma cherche à décrire les propriétés moyennes de la convection sur la maille. Il n'est pas conçu pour représenter des averses individuelles, mais il est attendu que les caractéristiques spatiales et temporelles moyennes de la convection soient saisies. On peut également imputer les déficiences observées aux précipitations légères produites par le schéma de grande échelle. La carte des biais de la figure 2.2 fait ressortir au niveau du massif du Morvan l'opposition de façade avec des biais positifs face au vent dominant et des biais négatifs pour les zones abritées du vent. Une résolution de 8km conduit à une tendance des précipitations à être trop persistante à un endroit donné (Kendon et al. 2012). Cette résolution combinée aux

4. Sol Eau Milieux Environnement

forçages orographiques va entraîner des sur-cumuls sur les mailles des zones exposées et moins de précipitations sur les mailles adjacentes à l'abri.

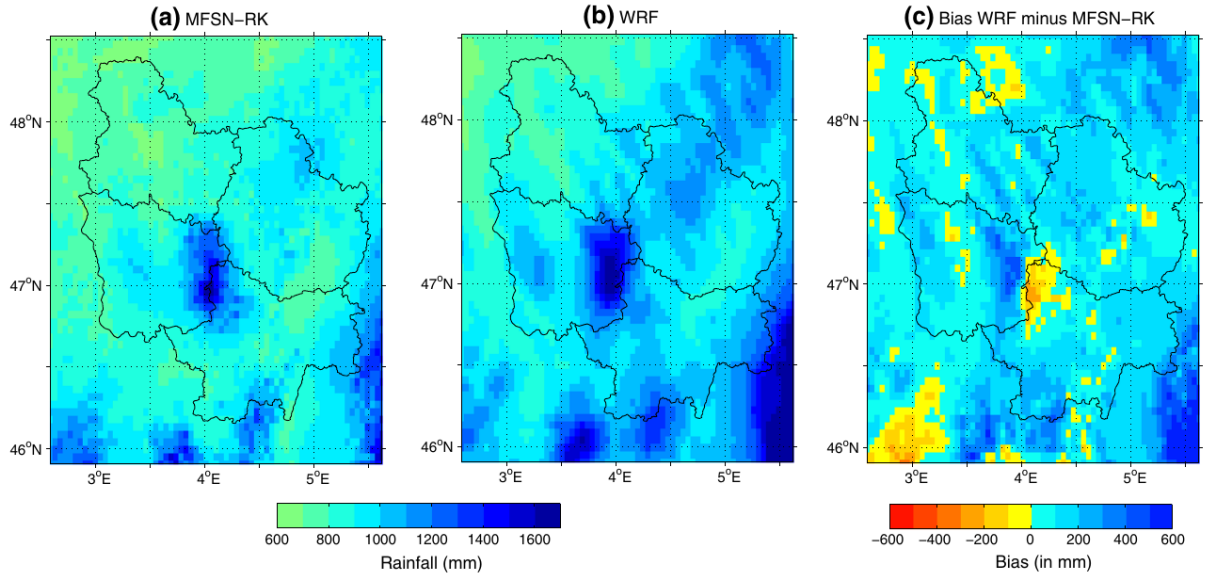


FIGURE 2.2 – Cartes du cumul annuel moyen a) des précipitationss observées par le réseau de stations de Météo-France et interpolées sur la maille du modèle par la méthode de Régression-Krigeage, b) des précipitations simulées par le modèle WRF et c) le biais correspond à la différence entre la carte (b) soustraite de la carte (a) d'après MARTEAU et al. (2015).

Finalement, une analyse synoptique a également montré qu'excepté pour les situations de blocage, les trois autres types de configurations atmosphériques qui dominent sur l'Atlantique nord ne permettent pas de discriminer les performances du modèle dans la reproduction des précipitations sur cette zone.

Comparativement aux premiers résultats (CASTEL et al. 2010), ces simulations d'un point de vue de l'analyse climatique montraient une capacité de la régionalisation dynamique à reproduire correctement la variabilité des températures de surface et des précipitations. Parallèlement à ce travail j'ai au cours de la même période co-encadré avec Yves Richard un Master 2 GéoBioSphère sur les Douglasaies en Bourgogne (DOLL 2010). Ce travail était sollicité par le CRPF [5] pour essayer appréhender le lien entre la sur-mortalité des pins Douglas observée suite à l'année caniculaire de 2003 et l'évolution du climat en contexte de changement.

L'ensemble de ces résultats m'ont conduit à déposer avec Pierre Camberlin en concertation avec les membres du CRC un sujet de thèse à l'école doctorale Environnement–Santé de l'Université de Bourgogne sur la problématique de la vulnérabilité des forêts du centre-est de la France face au changement climatique. Le dépérissement des peuplements de Douglasaies de Bourgogne notamment, avait fait l'objet de l'ANR DRYADE coordonnée par Nathalie Bréda. Cela a conduit à mettre en place un réseau de placettes en Bourgogne pour différentes stations forestières qui ont permis de calibrer et valider le modèle de bilan hydrique BILJOU (© INRAE). Nous nous sommes donc rapprochés de Nathalie Bréda et Vincent Badeau afin de collaborer dans le cadre de cette thèse.

2.3 Évaluation de la donnée climatique : calcul de bilan hydrique

Ce travail de recherche a fait l'objet de la thèse de doctorat de Damien Boulard (BOULARD 2016). L'articulation du modèle WRF avec le modèle BILJOU© s'est inscrite selon la figure 1.1 au deuxième niveau de l'évaluation des données climatiques régionalisées dynamiquement. Nous cherchions à savoir si leur qualité était suffisante pour produire un bilan hydrique sous

5. Centre Régional de la Propriété Forestière

couvert forestier valide et robuste. Le pas de temps journalier requis par le modèle BILJOU© pour les précipitations et l'évapotranspiration permet de pousser un cran plus loin l'analyse de la qualité des données climatiques. Sachant que les forêts sont soumises à une pression considérable en raison du changement climatique (Bonan 2008), il est de première importance de produire des indicateurs de contrainte et de croissance solides.

Dans un premier temps, la travail s'est focalisé sur 30 parcelles de pins Douglas (figure 2.3). Ces parcelles ont fait l'objet d'une calibration du modèle de bilan hydrique BILJOU© et ont permis de montrer que la croissance radiale des pins Douglas était très sensible aux sécheresses (Sergent et al. 2014). En intégrant les précipitations et l'évapotranspiration, le bilan hydrique est un métrique direct des impacts et indirect de la variabilité climatique.

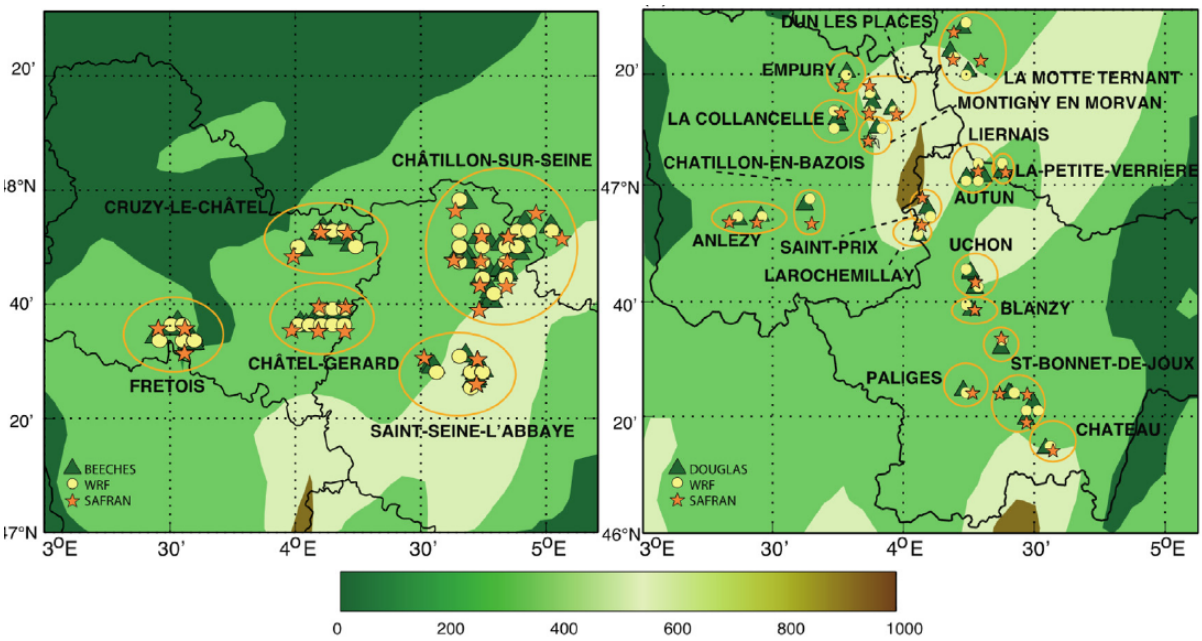


Figure 2.3 – Localisation des parcelles de pins Douglas (droite) et de hêtres (gauche) sur lesquelles le modèle de bilan hydrique a été calibré, validé et appliqué. La couleur de fond correspond à la topographie telle que représentée par WRF dans la grille du troisième domaine. Les étoiles oranges et les cercles jaunes symbolisent les mailles SIM et WRF les plus proches des parcelles forestières, d'après Boulard et al. (2017).

Afin d'évaluer la qualité des données régionalisées, le modèle de bilan hydrique a été forcé par des données climatiques des stations Météo-France les plus proches des parcelles, des données Safran-Isba-Modcou (SIM, Habets et al. 2008) et des données WRF. Les simulations du bilan hydrique ont été réalisées en continu sur la période 1989-2008. Le cycle annuel moyenne de la réserve en eau relative (ou Relative Extractible Water REW) a pu ensuite être calculé pour chaque jeu de données (figure 2.4). Les résultats montrent que les REW calculées à partir des données WRF et des données SIM sont significativement corrélées (Boulard et al. 2016). Néanmoins celles calculées à partir des données de WRF sont largement surestimées entre mai et octobre ce qui dégrade la capacité à produire un indice de déficit hydrique cohérent. Cet indice appliquant un seuil critique de 40%, un biais même faible dans la REW peut donc conduire à un biais beaucoup plus important sur l'indice de déficit hydrique. Par conséquent, comme cela est illustré à la figure 2.4, il est considéré qu'en moyenne il n'y a pas de contrainte hydrique pour ces peuplements. Or, le même calcul à partir des données des stations Météo-France et des données SIM montrent au contraire l'apparition de contraintes hydriques entre juillet et septembre. Le modèle de bilan hydrique révèle clairement les faiblesses de la régionalisation climatique qui s'y elles sont acceptables dans un certain contexte sont rédhibitoires dans le cas présent.

Le travail de la thèse de Damien Boulard a cherché à identifier quels étaient les verrous

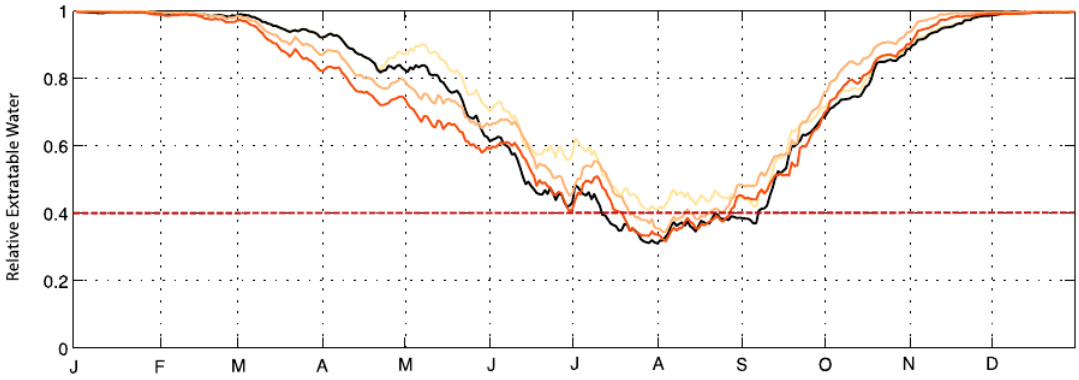


FIGURE 2.4 – Cycle annuel moyen (période 1989-2008, calculé pour les 30 parcelles) de la réserve en eau relative (REW) calculée à partir de WRF (courbe jaune), SIM (courbe orange), stations Météo-France (courbe rouge) et WRF avec les précipitations des stations (courbe noire), d'après BOULARD et al. (2016).

dans la qualité des données climatiques régionalisées par WRF. Une analyse a fait ressortir que les variables climatiques, intervenant dans le calcul de l'évapotranspiration potentielle, étaient correctement reproduites. Par contre, avec un biais moyen de +14% du cumul des précipitations plus marqué en été, ces dernières étaient la source principale de la mauvaise reproduction du bilan hydrique des parcelles de pins Douglas. En substituant les précipitations observées aux précipitations produites par WRF, les résultats présentés à la figure 2.4 (courbe noire) montrent un cycle annuel moyen plus proche de ceux obtenus à partir des données climatiques stationnelles (courbe rouge).

Ces résultats rejoignent ceux d'autres travaux qui pointent que l'incapacité de la régionalisation dynamique à reproduire avec suffisamment de précision les précipitations est un des verrous majeurs dans le forçage des modèles hydrologiques ou de bilan hydrique (TENG et al. 2015). Le modèle régional WRF est sujet à la sur-estimation des pluies (CALDWELL et al. 2009 ; LV et al. 2020) liée à un excès d'énergie de convection (HERWEHE et al. 2014). Ce biais d'énergie statique humide a pour partie été relié, dans le cas de WRF, à l'absence d'interaction sous-maille entre le schéma convectif et le schéma radiatif (ALAPATY et al. 2012). Notons que la version de WRF utilisée pour la thèse de Damien Boulard n'implémentait par ces interactions.

Ce verrou révèle un double handicap des approches de régionalisation dynamique quant à leur capacité à produire des métriques d'impact robustes. Ceci soulève par conséquent la question de la confiance à accorder à ces données climatiques pour analyser la variabilité climatique en contexte changeant. Pour contourner, ce verrou des méthodes de débiaisages statistiques ont été développées afin de post-corriger les simulations climatiques. Les méthodes basées sur le Quantile-Mapping sont celles qui sont le plus usitées (GUDMUNDSSON et al. 2012 ; MARAUN 2013 ; TEUTSCHBEIN et SEIBERT 2012). Si elles permettent de récupérer un signal climatique utile pour forcer les modèles d'impact, elles questionnent sur le sens à donner à la modification de la variabilité (e.g. extrêmes climatiques) avec le changement climatique (THEMESSL et al. 2012).

2.4 Amélioration de la qualité des données régionalisées : pistes explorées

2.4.1 Post-correction des biais des précipitations

La première piste étudiée dans le cadre de la thèse de Damien Boulard a consisté à post-corriger les précipitations produites par le modèle WRF selon une méthode de Quantile-Mapping. Cette méthode non-paramétrique est considérée robuste (GUDMUNDSSON et al.

2012 ; Teutschbein et Seibert 2012) et est sensible aux données d'observation (i.e. références). Les données de référence utilisées correspondent au jeu de données SIM qui couvre la période de simulation et l'ensemble de la zone d'étude à une résolution similaire. Notons que l'approche a été élargie, en plus des 30 parcelles de pins Douglas, à 54 parcelles de hêtres (Asse 2013). Les résultats montrent que la méthode de post-correction réussi à réduire significativement les biais du modèle pour les précipitations printanières et estivales. Cela améliore également la variabilité inter-annuelle ainsi que la géographie.

Malgré ces améliorations, les précipitations simulées par WRF n'ont par permis de reproduire correctement les déficits hydriques sur les parcelles de hêtres et de pins Douglas (Boulard et al. 2017). Afin comprendre l'origine de ces défaillances, deux années – 1990 et 1996 – ont été sélectionnées pour analyser finement la chronologie des séquences pluvieuses. L'idée était de voir si les défaillances étaient propres à un décalage des séquences pluvieuses ou à une incapacité à reproduire correctement l'occurrence et l'intensité des évènements pluvieux. Le Quantile-Mapping appliqué aux précipitations simulées par WRF (figure 2.5) présente deux résultats différents en fonction de l'année.

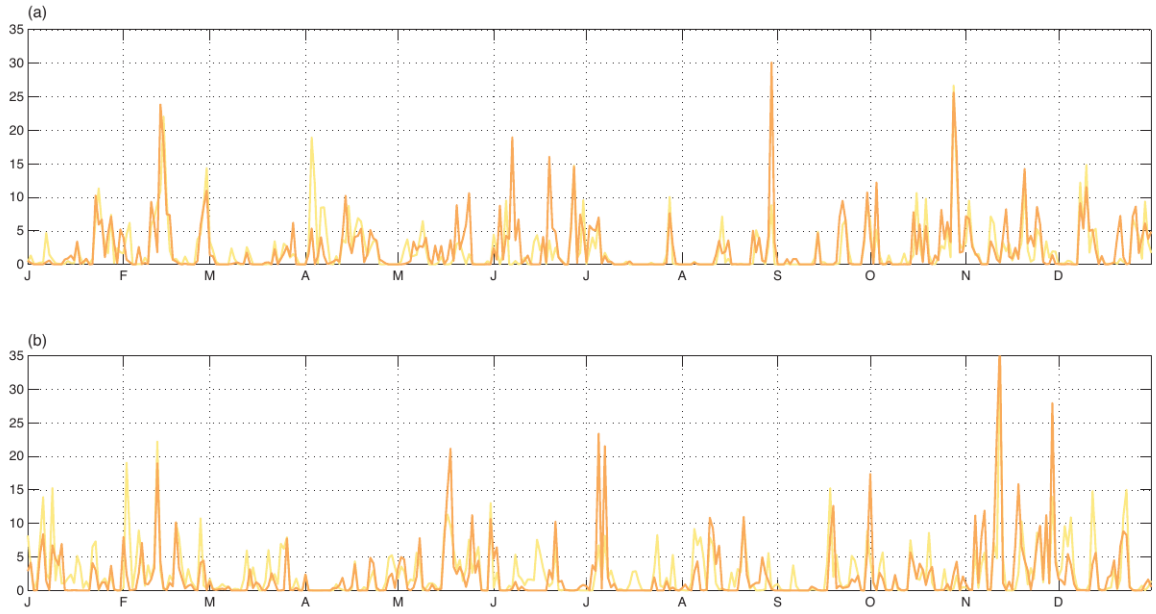


Figure 2.5 – Chronologie des précipitations journalières (en mm) simulées par WRF après post-correction (jaune) et SIM (orange), moyennées sur l'ensemble de la Bourgogne a) en 1990 et b) en 1996, d'après Boulard (2016).

En 1990, le cumul de précipitations annuel moyen (776mm) simulé par WRF est inférieur à celui de SAFRAN (855mm). Un biais sec est introduit par la post-correction (-79mm). Il faut rappeler en effet que la correction de l'intensité des évènements pluvieux simulés par WRF s'effectue globalement sur l'ensemble des années, si bien qu'au cours d'une année donnée des biais secs ou humides peuvent subsister. En 1996, les précipitations WRF corrigées présentent un cumul annuel de 933mm contre 822mm dans SIM, réduisant les différences entre les précipitations WRF brutes et SIM à 111mm. Les évènements pluvieux sur-estimés par WRF sont réduits par la méthode de correction notamment l'intensité des évènements simulés pendant la saison convective. Cependant, les évènements pluvieux sous-estimés par WRF par rapport à SIM sont globalement réduits, augmentant ainsi des biais secs. La post-correction des précipitations tend majoritairement à réduire les effectifs des classes pluvieuses dans le modèle WRF, et donc la surestimation de l'intensité des évènements pluvieux. Néanmoins, quelques erreurs importantes subsistent, notamment des cas où de fortes intensités journalières sont observées (>20mm) dont l'intensité est nettement sous-évaluée.

Cette analyse a permis de montrer l'incapacité de WRF, dans la version utilisée et selon le

protocole mis en oeuvre, à reproduire correctement ces évènements pluvieux et leur intensité ainsi que l'inaptitude du Quantile-Mapping utilisé ici à corriger la structure temporelle des précipitations (Themessl et al. 2012 ; White et Toumi 2013).

Dans la continuité de ces travaux, et parallèlement au développement du modèle WRF, j'ai cherché à améliorer en amont la qualité des simulations climatiques.

2.4.2 Nouvelle configuration de régionalisation

Cette piste s'est appuyée sur plusieurs améliorations survenues au cours de ces dernières années tant du côté du modèle WRF que du côté des réanalyses ERA [6]. La résolution des ERAINTERIM est passée de 130km à 80km et les toutes nouvelles ERA5 (Hersbach et al. 2020) sont actuellement sur une maille de 31km. L'implémentation des interactions entre schémas convectifs et radiatifs proposée par Alapaty et al. (2012) a ouvert des perspectives prometteuses pour la réduction des biais humides. La mauvaise reproduction de la structure temporelle des précipitations ainsi que des artefacts sur les températures sont possiblement dus à des incohérences entre la large échelle et le domaine régional. Or, il est essentiel de maintenir la circulation synoptique à l'intérieur du domaine de simulation cohérente avec la circulation synoptique aux limites du domaine (Omrani et al. 2015). La méthode du guidage offre la possibilité de maintenir cette cohérence dynamique susceptible d'améliorer la structure temporelle des précipitations. Suite à mon implication dans différents projets de recherche (ANR CoSAC, projets PubPrivLands et PSDR/Prosys) et avec le retour d'expériences de la thèse de Damien Boulard, j'ai décidé de redéfinir le protocole de régionalisation selon les axes suivants :

- descente d'échelle via deux domaines emboîtés de respectivement 48km (emprise EURO-CORDEX et 12km couvrant la quasi-totalité de la France ;
- application d'un guidage spectral (Liu et al. 2012) ;
- activation des interactions entre le schéma convectif et le schéma radiatif (Herwehe et al. 2014).

J'ai produit ces nouvelles simulations pour la période 1979-2016 grâce aux ressources du CCUB. Les premiers résultats ont montré une amélioration significative sur les cumuls inter-annuels des précipitations (figure 2.6) avec une très forte réduction de la sur-estimation voire une complète disparition.

Des résultats préliminaires encourageants ont été obtenus dans le cadre de l'ANR CoSAC en ouvrant des perspectives prometteuses (Cavan et al. 2020). Ce jeu de données est exploité par Valentin Blanchet dont la thèse a démarré en décembre 2020. Je co-dirige cette thèse avec Philippe Amiotte-Suchet (équipe SEDS [7] de l'UMR Biogéosciences). Le forçage du modèle BIJOU© par ces nouvelles simulations montre une amélioration significative du bilan hydrique simulé sur les parcelles de pins Douglas (Blanchet et al. 2022). Ces améliorations masquent toutefois pour la pluie, et par un effet de compensation, les biais persistants à l'échelle du cycle annuel. Ces biais sont, en effet, doublés par un biais positif sur le rayonnement pour les mois chauds. Nous avons pu montrer qu'une deuxième compensation impacte le calcul du bilan hydrique et conduit à une amélioration "artificielle" des métriques de stress hydriques des peuplements de pins Douglas (ibid.).

Nous avons progressé et nous pouvons espérer, avec les progrès tant en modélisation (amélioration des schémas physiques) qu'au niveau des données de forçage large échelle ou de la représentation des surfaces, d'améliorer encore la qualité des données régionalisés dynamiquement. Mais à quel coût et pour quel gain ? Une résolution cible plus fine (<1,5km) permet

6. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis
7. Sédimentologie, Environnement et Dynamique Sédimentaire

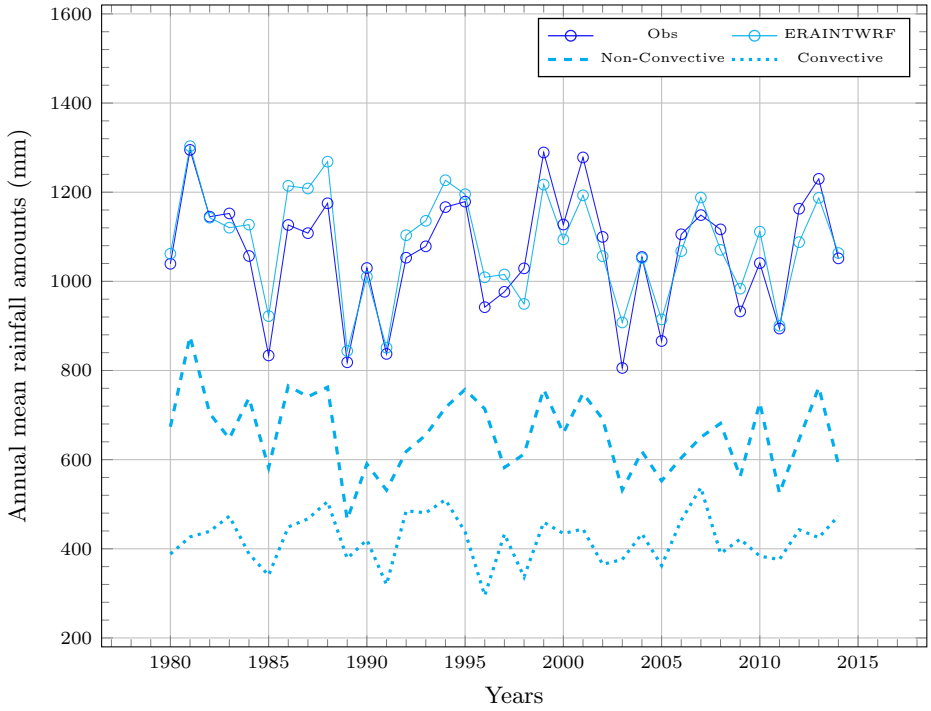


FIGURE 2.6 – Cumul annuel moyen des précipitations observées (Obs) et simulées (ERAINT/WRF) sur la région Bourgogne Franche-Comté. Les traits pointillés indiquent la séparation en précipitations convectives et non-convectives.

une meilleure reproduction des évènements pluvieux intenses (KENDON et al. 2012). Je ne pense pas que la "quête" à la très haute résolution pour des simulations sur plusieurs dizaines d'années, sur des territoires étendus, soit la solution et ce indépendamment des barrières matérielles et du coût en énergie que cela implique. Poursuivre l'articulation entre régionalisation dynamique, débiaisage et downscaling statistique ou géomatique me semble une voie plus adaptée pour :

— produire des données climatiques utiles et de qualité à une échelle opératoire ;

— investiguer la variabilité climatique de surface des échelles régionales aux échelles locales ;

— répondre à la demande sociétale de savoir à quels impacts s'attendre sur un territoire en fonction des futurs possibles du climat.

Références

ALAPATY, K., J. A. HERWEHE, T. L. OTTE, C. G. NOLTE, O. R. BULLOCK, M. S. MALLARD, J. S. KAIN et J. DUDHIA (2012). "Introducing subgrid-scale cloud feedbacks to radiation for regional meteorological and climate modeling". In : *Geophysical Research Letters* 39.24, n/a-n/a. ISSN : 1944-8007. DOI : 10.1029/2012GL054031. URL : http://dx.doi.org/10.1029/2012GL054031.

ASSE, D. (2013). "Etude dendroclimatique du hêtre (*Fagus Sylvatica* L.) sur les plateaux calcaires de Bourgogne : Analyse des incertitudes générées par les modèles climatiques à maille fine". Master 2 BFE – Ingéniérie écologique. AgroParisTech, 55p.

BLANCHET, V., P. AMIOTTE-SUCHET, N. BRÉDA, V. BADEAU et T. CASTEL (2022). "Apport d'un nouveau protocole de régionalisation dynamique du climat pour l'estimation du bilan hydrique de douglasaies". In : *35ème colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie*. Météo-France and Université Toulouse III. Toulouse, France, 6p. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-03693215.

Bonan, Gordon B. (2008). "Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests". In : *Science* 320.5882. Publisher: American Association for the Advancement of Science, p. 1444-1449. DOI : 10.1126/science.1155121. URL : https://www.science.org/doi/10.1126/science.1155121.

Bonnefoy, C. (2008). "Apport du modèle climatologique méso-échelle (WRF) à l'étude des relations climat-vigne en Bourgogne". Master 2 GéoBiosSphère. Université de Bourgogne, 54p.

Boulard, D. (2016). "Capacité d'une chaine de modélisation hydroclimatique haute résolution à simuler des indices de déficit hydrique : application aux douglasaies et hêtraies de Bourgogne". Thèse de doctorat. Université de Bourgogne, 233p.

Boulard, D., T. Castel, P. Camberlin, A.-S. Sergent, D. Asse, N. Bréda, V. Badeau, A. Rossi et B. Pohl (2017). "Bias correction of dynamically downscaled precipitation to compute soil water deficit for explaining year-to-year variation of tree growth over northeastern France". In : *Agricultural and Forest Meteorology* 232, p. 247-264. ISSN : 0168-1923. DOI : https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.08.021. URL : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192316303768.

Boulard, D., T. Castel, P. Camberlin, A.-S. Sergent, N. Bréda, V. Badeau, A. Rossi et B. Pohl (2016). "Capability of a regional climate model to simulate climate variables requested for water balance computation: a case study over northeastern France." In : *Climate Dynamics* 46.9-10. 28 pages, p. 2689-2716. DOI : 10.1007/s00382-015-2724-9. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01309572.

Caldwell, P., H.-N. S. Chin, D. C. Bader et G. Bala (2009). "Evaluation of a WRF dynamical downscaling simulation over California". In : *Climatic Change* 95.3, p. 499-521. ISSN : 1573-1480. DOI : 10.1007/s10584-009-9583-5. URL : https://doi.org/10.1007/s10584-009-9583-5.

Castel, T., Y. Xu, Y. Richard, B. Pohl, J. Crétat, D. Thevenin, C. Cuccia, B. Bois et P. Roucou (2010). "Désagrégation dynamique haute résolution spatiale du climat du Centre Est de la France par le modèle climatique régional ARW/WRF". In : *XXIIIeme colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Rennes, France. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00484826.

Castro, C. L., Sr. Pielke R. A. et G. Leoncini (2005). "Dynamical downscaling: Assessment of value retained and added using the Regional Atmospheric Modeling System (RAMS)". In : *J. Geophys. Res.* 110 (D5).

Cavan, N., T. Castel, J. Pergaud, F. Angevin et N. Colbach (2020). "Et demain? Robustesse des stratégies innovantes de gestion des adventices face au changement climatique". In : *Innovations Agronomiques* 81, p. 209-225. DOI : 10.15454/fqye-3778. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-03105517.

Chan, S. C., E. J. Kendon, H. J. Fowler, S. Blenkinsop, C. A. T. Ferro et D. B. Stephenson (2013). "Does increasing the spatial resolution of a regional climate model improve the simulated daily precipitation?" In : *Climate Dynamics* 41.5, p. 1475-1495. ISSN : 1432-0894. DOI : 10.1007/s00382-012-1568-9. URL : https://doi.org/10.1007/s00382-012-1568-9.

Dee, D. P. et al. (2011). "The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system". In : *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137.656, p. 553-597. ISSN : 1477-870X. DOI : 10.1002/qj.828. URL : http://dx.doi.org/10.1002/qj.828.

Di Luca, A., R. de Elía et R. Laprise (2012). "Potential for added value in precipitation simulated by high-resolution nested Regional Climate Models and observations". In : *Climate Dynamics* 38.5, p. 1229-1247. ISSN : 1432-0894. DOI : 10.1007/s00382-011-1068-3. URL : https://doi.org/10.1007/s00382-011-1068-3.

Doll, D. (2010). "Apport et analyse des images satellites MODIS pour le suivi des douglasaies en Bourgogne". Master 2 GéoBiosSphère. Université de Bourgogne, 57p.

Feser, F., B. Rockel, H. von Storch, J. Winterfeldt et M. Zahn (2011). "Regional Climate Models Add Value to Global Model Data: A Review and Selected Examples". In : *Bulletin of the American Meteorological Society* 92.9. Publisher: American Meteorological Society Section: Bulletin of the American Meteorological Society, p. 1181-1192. DOI : 10.1175/2011BAMS3061.1. URL : https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/92/9/2011bams3061_1.xml.

Fumière, Q., M. Déqué, O. Nuissier, S. Somot, A. Alias, C. Caillaud, O. Laurantin et Y. Seity (2020). "Extreme rainfall in Mediterranean France during the fall: added value of the CNRM-AROME Convection-Permitting Regional Climate Model". In : *Climate Dynamics* 55.1, p. 77-91. ISSN : 1432-0894. DOI : 10.1007/s00382-019-04898-8. URL : https://doi.org/10.1007/s00382-019-04898-8.

Gibba, P., M. B. Sylla, E. C. Okogbue, Amadou T. G., M. Nikiema et I. Kebe (2019). "State-of-the-art climate modeling of extreme precipitation over Africa: analysis of CORDEX added-value over CMIP5". In : *Theoretical and Applied Climatology* 137.1, p. 1041-1057. ISSN : 1434-4483. DOI : 10.1007/s00704-018-2650-y. URL : https://doi.org/10.1007/s00704-018-2650-y.

Glotter, M., J. Elliott, D. McInerney, N. Best, I. Foster et E. J. Moyer (2014). "Evaluating the utility of dynamical downscaling in agricultural impacts projections". In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111.24. Publisher: Proceedings of the National Academy of Sciences, p. 8776-8781. DOI : 10.1073/pnas.1314787111. URL : https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1314787111 (visité le 03/2023).

Gudmundsson, L., J. B. Bremnes, J. E. Haugen et T. Engen-Skaugen (2012). "Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations – a comparison of methods". In : *Hydrology and Earth System Sciences* 16.9, p. 3383-3390. DOI : 10.5194/hess-16-3383-2012. URL : https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/16/3383/2012/.

HABETS, F. et al. (2008). "The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France". In : *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 113 (D6). ISSN : 2156-2202. DOI : 10.1029/2007JD008548. URL : https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2007JD008548.

HERSBACH, Hans et al. (2020). "The ERA5 global reanalysis". In : *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146.730, p. 1999-2049. ISSN : 1477-870X. DOI : 10.1002/qj.3803. URL : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.3803.

HERWEHE, J. A., K. ALAPATY, T. L. SPERO et C. G. NOLTE (2014). "Increasing the credibility of regional climate simulations by introducing subgrid-scale cloud-radiation interactions". In : *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 119.9, p. 5317-5330. ISSN : 2169-8996. DOI : 10.1002/2014JD021504. URL : https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2014JD021504.

HOUZÉ, M.-L. (2006). "Prévision et spatialisation des concentrations en ozone troposhérique en Bourgogne". Thèse de doct. Université de Bourgogne.

KENDON, E. J., N. M. ROBERTS, C. A. SENIOR et M. J. ROBERTS (2012). "Realism of Rainfall in a Very High-Resolution Regional Climate Model". In : *Journal of Climate* 25.17. Publisher: American Meteorological Society Section: Journal of Climate, p. 5791-5806. ISSN : 0894-8755, 1520-0442. DOI : 10.1175/JCLI-D-11-00562.1. URL : https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/25/17/jcli-d-11-00562.1.xml.

KLEIN, G. (2011). "Variabilité inter-annuelle (1989–2009) simulée (ARW/WRF) et observée des précipitations en Bourgogne." Master 2 GéoBiosSphère. Université de Bourgogne, 51p.

LEGAT, J. (2007). "Apports du modèle météorologique (WRF) dans l'estimation des conditions climatiques aux échelles régionales et infra-régionales". Master 2 GéoBiosSphère. Université de Bourgogne, 47p.

LIU, P., A. P. TSIMPIDI, Y. HU, B. STONE, A. G. RUSSELL et A. NENES (2012). "Differences between downscaling with spectral and grid nudging using WRF". In : *Atmospheric Chemistry and Physics* 12.8, p. 3601-3610. ISSN : 1680-7324. DOI : 10.5194/acp-12-3601-2012. URL : https://www.atmos-chem-phys.net/12/3601/2012/.

LV, M., Z. XU et Z.-L. YANG (2020). "Cloud Resolving WRF Simulations of Precipitation and Soil Moisture Over the Central Tibetan Plateau: An Assessment of Various Physics Options". In : *Earth and Space Science* 7.2. _eprint: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2019EA000865, e2019EA000865. ISSN : 2333-5084. DOI : 10.1029/2019EA000865. URL : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019EA000865.

MARAUN, Douglas (182013). "Bias Correction, Quantile Mapping, and Downscaling: Revisiting the Inflation Issue". In : *Journal of Climate* 26.6, p. 2137-2143. ISSN : 0894-8755. DOI : 10.1175/JCLI-D-12-00821.1. URL : https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/JCLI-D-12-00821.1.

MARTEAU, R., Y. RICHARD, B. POHL, C. SMITH CHATEAU et T. CASTEL (2015). "High-resolution rainfall variability simulated by the WRF RCM: application to eastern France". In : *Climate Dynamics* 44.3, p. 1093-1107. ISSN : 1432-0894. DOI : 10.1007/s00382-014-2125-5. URL : https://doi.org/10.1007/s00382-014-2125-5.

MASS, C. F., D. OVENS, K. WESTRICK et B. A. COLLE (2012). "Does Increasing Horizontal Resolution Produce More Skillful Forecasts?" In : *Bulletin of the American Meteorological Society* 83.3, p. 407-430.

OMRANI, Hiba, Philippe DROBINSKI et Thomas DUBOS (2015). "Using nudging to improve global-regional dynamic consistency in limited-area climate modeling: What should we nudge?" In : *Climate Dynamics* 44.5, p. 1627-1644. ISSN : 0930-7575, 1432-0894. DOI : 10.1007/s00382-014-2453-5. URL : http://link.springer.com/10.1007/s00382-014-2453-5.

RUMMUKAINEN, M. (2016). "Added value in regional climate modeling". In : *WIREs Climate Change* 7.1. _eprint: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/wcc.378, p. 145-159. ISSN : 1757-7799. DOI : 10.1002/wcc.378. URL : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wcc.378.

SERGENT, A.-S., P. ROZENBERG et N. BRÉDA (2014). "Douglas-fir is vulnerable to exceptional and recurrent drought episodes and recovers less well on less fertile sites". In : *Annals of Forest Science* 71.6, p. 697-708. ISSN : 1297-966X. DOI : 10.1007/s13595-012-0220-5. URL : https://doi.org/10.1007/s13595-012-0220-5.

SIJIKUMAR, S., P. ROUCOU et B. FONTAINE (2006). "Monsoon onsetover Sudan-Sahel: simulation by the regional scale model MM5". In : *Geophys. Res. Lett.* 33 (L03814), doi:10.1029/2005GL024819.

SKAMAROCK, C. et al. (2021). "A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4". In : DOI : 10.5065/1dfh-6p97. URL : https://opensky.ucar.edu/islandora/object/technotes%3A576/.

TENG, J., N. J. POTTER, F. H. S. CHIEW, L. ZHANG, B. WANG, J. VAZE et J. P. EVANS (2015). "How does bias correction of regional climate model precipitation affect modelled runoff?" In : *Hydrology and Earth System Sciences* 19.2. Publisher: Copernicus GmbH, p. 711-728. ISSN : 1027-5606. DOI : 10.5194/hess-19-711-2015. URL : https://hess.copernicus.org/articles/19/711/2015/.

TEUTSCHBEIN, C. et J. SEIBERT (2012). "Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods". In : *Journal of Hydrology* 456-457, p. 12-29. ISSN : 0022-1694. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2012.05.052. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169412004556.

THEMESSL, M. J., A. GOBIET et G. HEINRICH (2012). "Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal". In : *Climatic Change* 112.2, p. 449-468. ISSN : 1573-1480. DOI : 10.1007/s10584-011-0224-4. URL : https://doi.org/10.1007/s10584-011-0224-4.

White, R. H. et R. Toumi (2013). "The limitations of bias correcting regional climate model inputs". In : *Geophysical Research Letters* 40.12, p. 2907-2912. ISSN : 1944-8007. DOI : 10.1002/grl.50612. URL : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/grl.50612.

Xu, Y., T. Castel, Y. Richard, C. Cuccia et B. Bois (2012). "Burgundy regional climate change and its potential impact on grapevines". In : *Climate Dynamics* 39.7, p. 1613-1626. ISSN : 1432-0894. DOI : 10.1007/s00382-011-1284-x. URL : https://doi.org/10.1007/s00382-011-1284-x.

Chapitre 3

Réchauffement climatique : portrait et impacts régionalisés

■ *All together this evidence represents a very strong case in my opinion that the green house effect has been detected and is changing climate now.* ■

James Hansen – June 23, 1988

Sommaire

3.1 Cadre et problématique des travaux 23
3.2 Portrait du réchauffement climatique régional 24
3.3 Impacts régionalisés : risque gélif hivernal 26
3.4 Perceptions du réchauffement climatique 30

3.1 Cadre et problématique des travaux

J'ai dès l'année 2008 commencé à aborder la régionalisation du climat de manière ascendante en m'appuyant sur les données climatiques observées. Au cours de ces années, et suite à la publication en 2007 du 4e rapport du GIEC [1] (IPCC 2007), de nombreux acteurs régionaux se sont emparés de la question du réchauffement climatique. Outre l'augmentation des températures, ce rapport confirmait également le rôle déterminant et indiscutable joué par le forçage radiatif d'origine anthropique. Cela n'a cessé d'être précisé et confirmé depuis. A l'échelle de la France l'analyse de séries longues homogénéisées des températures montrait un réchauffement plus important que celui observé par le GIEC au niveau planétaire (Moisselin et al. 2002). La réception de ces éléments par les populations, leurs ressentis et les observations de l'avancement constant des dates des vendanges, les modifications des cycles phénologiques ou la vague de chaleur de 2003 ont contribué à amplifier la prise de conscience. Le climat change et cela se voit. Mais comment change t-il sur la région Bourgogne ? Avec quelle amplitude ? Selon quel rythme ? Identique pour toutes les saisons et l'ensemble du territoire ? Voici des questions que nous nous sommes posés et/ou que l'on nous a adressées. Des gestionnaires, des inter-professions agricoles, des collègues agronomes, sociologues et hydro-géochimistes ont sollicité directement ou indirectement le CRC sur ce sujet. Je me suis engagé sur cet axe avec Yves Richard, Malika Madelin puis Benjamin Bois, Jean-Pierre Chabin pour renforcer et réactualiser les connaissances sur les modalités d'évolution du climat à l'échelle de la région, de l'agglomération ou de la parcelle cultivée. Mon appartenance au ministère de l'agriculture, mon appétence et les circonstances ont fait que je me suis naturellement tourné vers l'étude de l'effet de l'évolution et de la variabilité du climat sur les cultures agricoles (pois d'hiver, vigne), la forêt (qui était au centre de mes travaux de thèse et de post-doc) ou plus récemment les eaux de surface.

Lorsqu'on s'intéresse à la variabilité climatique de surface aux échelles fines (quelques m^2 à quelques dizaine de km^2) des découplages locaux s'opèrent (Daly et al. 2010). Les températures minimales sont sujettes à des inversions pouvant atteindre plusieurs degrés en hiver et en présence de relief. Ceci conduit à des structures complexes des températures qui peuvent affecter le gradient altitudinal (Joly et al. 2018). Ainsi en présence de relief la variation locale de l'augmentation de la température est susceptible d'être moins cohérente dans l'espace que l'augmentation de la température prévue par les modèles globaux et régionaux. Je me suis attaché à partir du réseau de stations de Météo-France à spatialiser les températures et les précipitations à une résolution adaptée (Hengl 2006) et au pas de temps journalier. J'ai mis pour cela en oeuvre de méthodes statistiques de Régression-Krigeage (Hengl et al. 2007). En plus de nous permettre d'identifier les patrons de la variabilité, ce jeu nous a servi, avant l'obtention des données SIM, *i*) de référence pour comparaison avec les données des simulations (Marteau et al. 2015) et *ii*) pour forcer un modèle de stress gel du pois d'hiver (Castel et al. 2017).

Le postulat ici aussi est que les modèles d'impacts peuvent indirectement documenter les modalités de l'évolution des températures et/ou des précipitations observées. On peut raisonnablement penser que eu égard aux processus qui gouvernent la dynamique et la thermodynamique du système, l'évolution des températures ne soit ni linéaire ni progressive (Abarca-Del-Rio et Mestre 2006 ; Franzke 2014). Des travaux ont mis en évidence un 'shift' ou une accélération des températures soit directement (Beaugrand 2004 ; Figura et al. 2011 ; Laat et Crok 2013 ; Reid et Beaugrand 2012 ; Richard et al. 2014 ; Xiao et al. 2012) soit indirectement (Beaugrand et al. 2008 ; Donnelly et al. 2009 ; Hari et al. 2006 ; Marty 2008 ; Matić et al. 2011 ; Reid et al. 2016) au cours des années 1980. Dans cet axe, j'ai également cherché à caractériser quelles étaient les modalités de l'évolution multi-scalaire des températures et des précipitations. Tout d'abord à l'échelle de la Bourgogne puis de la France et de l'Europe de l'ouest. En m'appuyant sur ces modalités, j'ai ensuite cherché

1. Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat

à quantifier les impacts du réchauffement sur la phénologie de la vigne (particulièrement du pinot noir), le débit des rivières et le risque gélif hivernal.

Lorsque l'on parle de réchauffement climatique on pense d'abord à la période chaude (deuxième partie du printemps, été et début d'automne) et dans une moindre mesure à l'automne et à l'hiver. Or, en climat tempéré, les cultures d'hiver comme les écosystèmes sont acclimatés à la survenue des basses températures souvent gélives. Des auteurs ont pointé dès les années 1980 que le réchauffement climatique pourrait paradoxalement conduire à accroître le risque gélif (Cannell et Smith 1986). Plus de risques gélifs printaniers tardifs ont été observés sur des peuplements forestiers (Augspurger 2013) avec une augmentation en Europe due au changement climatique (Lamichhane 2021). Peu de travaux ont, à ma connaissance, porté sur l'évolution du risque gélif hivernal en contexte de réchauffement. Les effets sont difficiles à observer directement et ne sont souvent visibles que lorsqu'il y a reprise de croissance excepté peut être pour les évènements exceptionnels. Ball et al. (2012) suggèrent une plus grande vulnérabilité au froid hivernal avec des températures moins basses. L'argument avancé est qu'il y aurait une perturbation de l'acclimatation aux températures basses.

L'hiver 2011-2012 s'est soldé par des dégâts gélifs massifs en grande culture (blé et orge d'hiver, protéagineux) sur tout le centre-est/nord-est de la France. Les surfaces affectées par le gel ont été importantes, et les besoins de ressemis localement forts (supérieurs à 20-30 %). En première approche, cet épisode pourrait faire penser à un évènement exceptionnel. Or, cet hiver 2011-2012 était plus doux que la moyenne. La minimale des températures minimales est descendue aux alentours de -13°C en février en Bourgogne. Ce froid est loin d'être exceptionnel pour cette région et les variétés semées sont habituellement sélectionnées pour résister à ces températures négatives. Que s'est-il passé ? Pourquoi autant de dégâts ? Y aurait il un lien avec le réchauffement climatique ? Mes collègues Annabelle Larmure et Christophe Lecomte de l'UMR Agroécologie (Dijon) avec qui j'avais collaboré dans le cadre d'un projet PSDR[2] PROFILE (2008-2010 – Duc et al. 2010) nous ont interpellé à ce sujet. Avec Yves Richard nous avons travaillé sur ce thème en collaboration avec ces collègues de l'UMR Agroécologie. Cette collaboration s'est poursuivie dans le cadre du projet PSDR Prosys (2016-2020 – Ubertosi et al. 2022). Ces travaux ont permis de croiser notre caractérisation du réchauffement climatique sur la région avec le modèle de stress gel du pois d'hiver. Ce modèle a été développé sur la base de celui du blé (Lecomte et al. 2003). Ce sont les éléments de ces activités que je vais présenter dans cette partie.

3.2 Portrait du réchauffement climatique régional

Ce travail a tout d'abord fait l'objet du Master 2 GéoBiosphère de Cédric Cuccia (2007-2008 – Cuccia 2008) que j'ai co-encadré avec Yves Richard. En se basant sur les observations des stations Météo-France depuis 1961 (date à partir de laquelle le réseau est suffisamment dense), l'analyse a consisté à étudier l'évolution inter-annuelle et saisonnière des températures et des précipitations. Les résultats ont confirmé pour la région Bourgogne et pour la période 1961-2007 une augmentation significative des moyennes annuelles des températures minimales et maximales de l'ordre de $+0,39$°C et $+0,41$°C par décennie, respectivement. Aucune tendance significative n'a été observée sur les cumuls annuels des précipitations. En testant la stationnarité par les tests non paramétriques de Pettitt (Pettitt 1979) et SMWDA[3] (Kemp et al. 1994), le travail de Cédric Cuccia a révélé un changement abrupt – i.e. une rupture – vers les années 1987/1988 sur les séries des températures (figure 3.1). Nous n'avons depuis cessé de confirmer, préciser et étendre ces résultats (Brulebois et al. 2015 ; Laurent et al. 2023 ; Richard et al. 2014). Tout d'abord nous avons complété et étendu les séries. Ensuite nous avons élargi à des espaces géographiques plus vastes (France et Europe de l'ouest) à

2. Programme de recherche partenariale Pour et Sur le Développement Régional
3. Split Mowing Window Difference Average

partir des jeux de données grillées (SIM et E-OBS – Cornes et al. 2018). Enfin, j'ai mobilisé des méthodes fréquentistes (Zeileis et al. 2003) et bayesiennes (Ruggieri 2013) de détection de ruptures dans les séries.

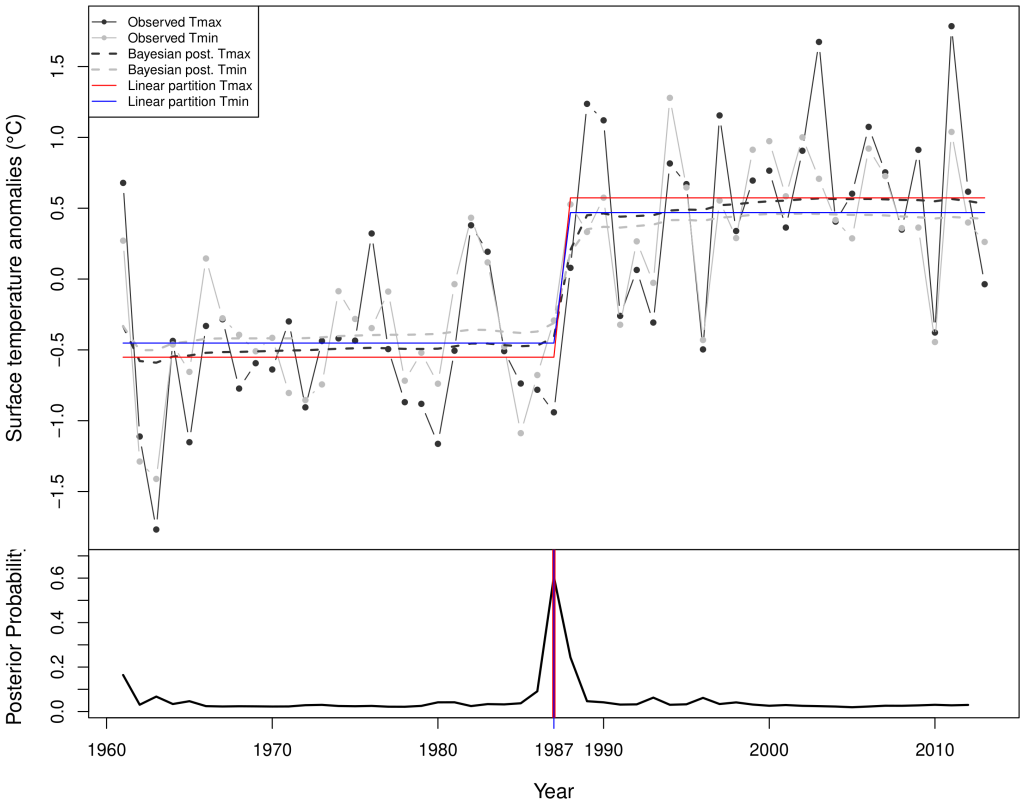


Figure 3.1 – Évolution des anomalies des températures minimales (Tmin) et maximales (Tmax) sur la période 1961-2013. Les anomalies sont calculées par rapport à la normale 1961-1990 et pour 128 stations réparties sur la France métropolitaine. Les traits pleins bleu (Tmin) et rouge (Tmax) correspondent à la méthode fréquentiste de partition linéaire. Les traits pointillés gris clair et gris foncé représentent la moyenne calculée a posteriori par la méthode bayesienne. Le graphique du bas indique, par les traits verticaux bleu et rouge (qui sont ici superposés), l'année où un changement abrupt est détecté par la méthode de partition linéaire. Le trait noir continu représente la probabilité a posteriori d'avoir pour une année donnée un changement abrupt. Cette probabilité est maximale en 1987, d'après Brulebois et al. (2015).

La figure 3.1 montre que cette rupture est partagée par les températures minimales et maximales. De plus l'amplitude du réchauffement est plus importante sur les températures maximales. Ce dernier point questionne car dans le cadre du changement climatique il est attendu normalement que les températures minimales augmentent plus que les maximales en lien avec le renforcement de l'effet de serre. L'analyse montre également que toutes les saisons se sont significativement réchauffées mais pas avec la même ampleur. C'est pour le printemps que le signal est le plus fort avec un réchauffement moyen de plus $+1,5°C$ et alors que l'automne est la saison où l'augmentation des températures est la plus faible $+0,5°C$ (Brulebois et al. 2015) . Cette disparité saisonnière interroge également sur les mécanismes qui sont à l'origine des modalités de ce réchauffement.

Quel que soit le jeu de données ou la méthode, tout converge vers un changement abrupt et significatif dans les séries de températures. Les méthodes de détection de la non stationnarité des séries temporelles sont possiblement sensibles à la longueur des séries. C'est une remarque qui nous a – à juste titre – été souvent adressée par des auditeurs lors de congrès ou des reviewers de nos articles. J'ai réalisé un travail complémentaire à partir de séries mensuelles longues (démarrant en 1880) et homogénéisées. Les résultats de la figure 3.2 ne montrent aucun 'effet longueur' de la série et confirment un changement abrupt et structurel autour

des années 1987/1988.

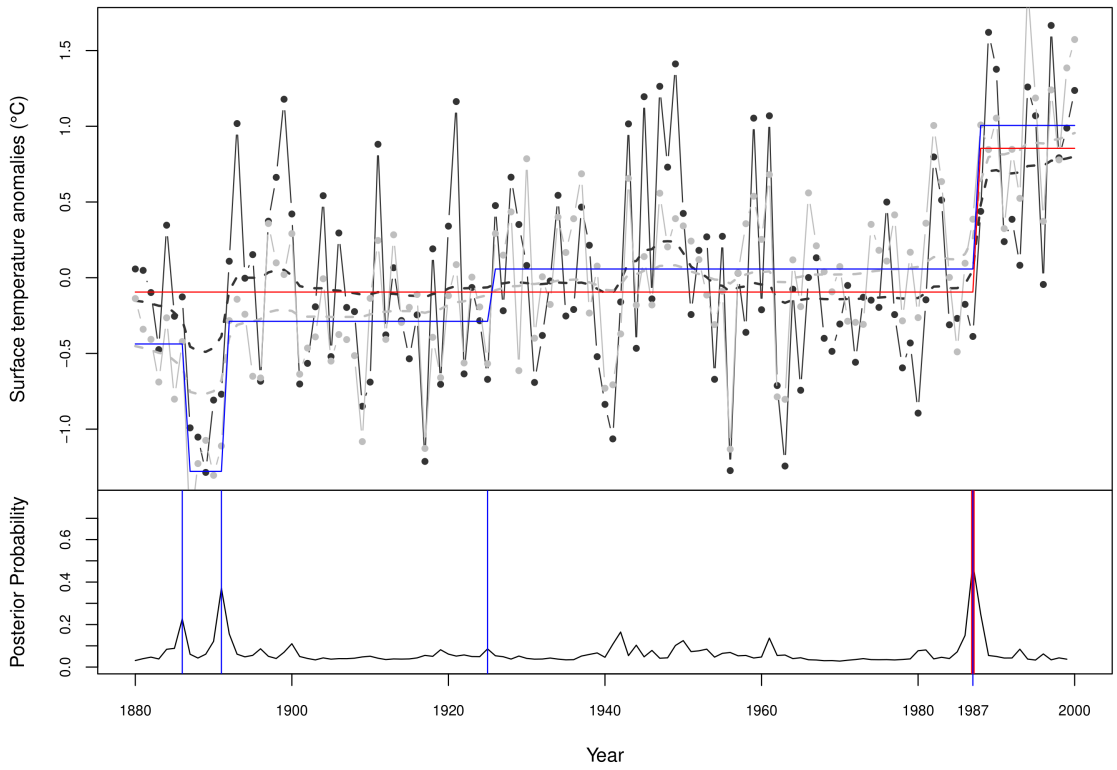


FIGURE 3.2 – Évolution des anomalies des températures minimales (Tmin) et maximales (Tmax) sur la période 1880-2000. Les anomalies sont calculées par rapport à la normale 1961-1990 et pour quelques stations en France. Pour le reste se référer à la figure 3.1

.

Un nouveau 'shift'/accélération semble être intervenu plus récemment autour des années 2013/2014. La profondeur temporelle des séries ne permet pas de consolider ce résultat mais cela fait écho aux conditions de sécheresses et des vagues de chaleur observées au cours de ces dernières années.

Je me suis appuyé dans mes travaux sur cette rupture et sur l'opportunité qu'elle offre pour analyser les effets du réchauffement climatique sur les agro- et hydro-systèmes. Suite à son master, Cédric Cuccia a réalisé une thèse que j'ai co-dirigée avec Yves Richard. Dans sa thèse il a montré les modifications significatives du cycle phénologique du pinot noir en Bourgogne de part et d'autre de la rupture de 1987/1988 (CUCCIA et al. 2014). J'ai également suivi la thèse d'Étienne Brulebois qui a montré la baisse des débits de 23 cours d'eau en France de part et d'autre de cette rupture (BRULEBOIS et al. 2015). Dans le cadre de la thèse Cifre (financement Groupama), de Léa Laurent – que je co-encadre avec Albin Ullmann – nous travaillons sur le risque de sécheresse de grandes cultures suite au réchauffement abrupt (LAURENT et al. 2023). De plus, en m'appuyant sur cette rupture, j'ai analysé l'évolution du stress froid du pois d'hiver et j'ai proposé une modélisation du risque gélif.

3.3 Impacts régionalisés : risque gélif hivernal

L'acclimatation des végétaux aux conditions de froid extrêmes s'appuie sur une exposition (progressive et continue) aux basses températures accompagnée d'une réduction de la photopériode (HANNINEN 2006). Cette phase d'endurcissement conduit la plante à un état qui permet sa résistance/ survie face aux températures minimales gélives hivernales. Des automnes et des hivers moins frais peuvent donc conduire à *i*) un moins bon niveau de résistance acquise, *ii*) retarder le processus d'acquisition de la résistance (i.e. vitesse d'acclimatation),

iii) la dé-acclimatation au cœur de l'hiver et *iv*) accélérer la dé-acclimatation en sortie d'hiver. Isolées ou combinées, ces quatre possibilités aboutissent inéluctablement à une vulnérabilité accrue face à l'aléa climatique (vagues de gel). En climat sub-antarticque, une diminution de la résistance au gel a été observée (Sierra-Almeida et al. 2018). En zone alpine, l'augmentation des dégâts gélifs est liée à une dé-acclimatation et à une fonte de neige précoce (Rixen et al. 2012). Ces résultats, qui appuient l'hypothèse d'une modification du risque gélif avec le réchauffement, sont obtenus principalement pour des froids "extrêmes". Qu'en est-il en climat tempéré ? Est-ce que le réchauffement de l'hiver de l'ordre de $+0,9°C$ en moyenne a affecté ce risque et comment ?

Un modèle de stress gel initialement développé pour le blé a été adapté, paramétré et validé pour le pois d'hiver (Castel et al. 2017 ; Lecomte et al. 2003) à partir d'expérimentations conduites sur des sites de l'INRAE situés à Chaux-des-prés (39), Clermont-Ferrand (63), Dijon (21), Colmar (68), Lusignan (86) et Mons en Belgique. Le modèle calcule journalièrement la valeur de résistance au gel R_j du jour j (exprimé en degré Celsius). Pour cela on calcule la valeur de résistance 'effective' Re_j qui va dépendre de la température moyenne du jour j ($Tmoy_j$) et de la valeur de résistance maximale R_{max} et minimale R_{min}. R_{max} est la résistance maximale atteinte à la fin du processus d'endurcissement. R_{min} est la résistance minimale observé sans endurcissement de la plante. Ces deux valeurs sont dépendantes du génotype et du stade foliaire de la plante. Le stade foliaire est estimé à partir du calcul des degrés-jours cumulés pour $Tmoy_j > 0°C$ et du rythme d'apparition des stades foliaires. Enfin, le calcul va dépendre de la résistance au froid acquise du jour précédent R_{j-1} ce qui peut être formalisé comme suit :

$$R_j = \begin{cases} Max[(R_{j-1} + dR); Re_j] \text{ avec } dR = \frac{Re_j - R_{min}}{njend} & \text{si } R_{j-1} > Re_j \\ Min[(R_{j-1} + dR); Re_j] \text{ avec } dR = [\frac{R_{min} - R_{max}}{100}] \times Tmoy_j & \text{si } R_{j-1} < Re_j \end{cases} \quad (3.1)$$

avec $njend$ nombre de jours pour atteindre la valeur maximale de résistance (i.e. vitesse d'acclimatation). La première ligne de l'équation 3.1 modélise le mécanisme d'endurcissement et la deuxième ligne celui de désendurcissement (i.e. dé-acclimatation).

Les variables entrées du modèle sont :

- les températures journalières minimales et maximales ;
- la date de semis ;
- le seuil maximal (i.e. température minimale en deçà de laquelle un stress gel survient) de résistance au gel ;
- la vitesse d'acclimatation $njend$.

La figure 3.3 présente le résultat d'une simulation du modèle de stress gel pour l'hiver 2011-2012. La plante est considérée en situation de stress lorsque la courbe des températures minimales (trait bleu continu) croise la courbe de la résistance effective (trait vert continu). Le stress gel correspond alors à la valeur cumulée (exprimée en degrés-jours) de la différence entre la valeur de résistance effective et la valeur pour le même jour de la température minimale (zone en rouge). Il a été montré que cette valeur de stress gel était significativement corrélée aux dégâts gélifs observés au champ (Castel et al. 2017). En d'autres termes, le stress gel est un bon proxy des dégâts gélifs.

Cette simulation (figure 3.3) permet également d'illustrer l'importance du mécanisme d'acclimatation. En effet, la simulation montre que la survenue du stress gel et son amplitude sont déterminées par une résistance effective plus faible que la résistance seuil possible pour cette variété. Cette résistance effective peut être interprétée comme un indicateur du niveau de vulnérabilité au stress gel des plantes. Lors de cet épisode, la plus grande vulnérabilité du pois combinée à la survenue rapide de températures négatives est la cause première du fort niveau du stress gel et des importants dégâts associés. Notons que si le niveau de la

résistance seuil avait été atteint, les pois n'auraient subi qu'un très léger stress gel. Le niveau d'acclimatation a été perturbé par des températures moyennes journalières douces en fin d'automne et durant les mois de décembre et de janvier. Avec le réchauffement climatique, ce type de situation est susceptible de devenir plus fréquent.

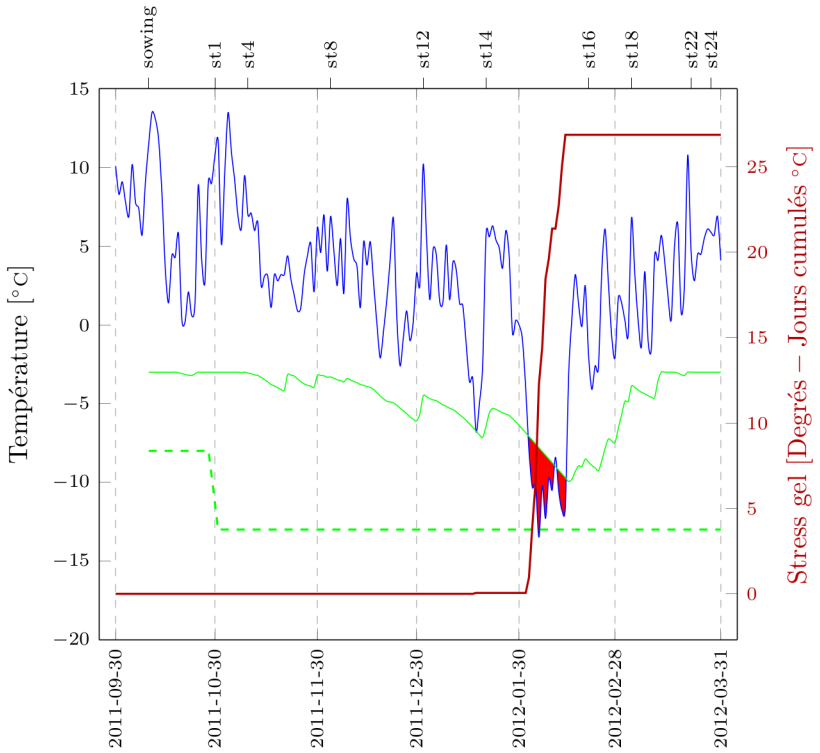


FIGURE 3.3 – La simulation porte sur une variété de pois avec une R_{max} de -13°C, une vitesse d'acclimatation de 42 jours, et un semis (sowing) le 10 octobre 2011. La simulation est réalisée pour les conditions climatiques de Bretenière (21) durant l'hiver 2011/2012. La courbe continue bleue représente l'évolution journalière des températures minimales. Les courbes vertes (continu et tireté) représentent respectivement les résistances maximale R_{max} et effective R_j du pois. Cette dernière peut être vue comme le niveau de vulnérabilité du pois. La courbe continue rouge indique le niveau du stress gel. Le pois est considéré en stress gel à chaque fois que la courbe bleue croise la courbe verte continue. La surface rouge correspond au stress gel cumulé exprimé en degré-jours. Il a été montré que les dégâts gélifs observés sont proportionnels à cette valeur cumulée, d'après T. CASTEL et al. (2019).

Lorsqu'un modèle est capable de reproduire/mimer des observations avec un niveau de confiance suffisant, on peut explorer un domaine des possibles plus étendu que ce que nous permet l'expérimentation. Dans le cas présent, plusieurs traits culturaux (dates de semis) et plusieurs traits variétaux (vitesse d'endurcissement et résistance seuil) ont été croisés afin d'élargir le panel des combinaisons. Pour chacune de ces configurations, pour toutes les années de 1959 à 2015 et pour toutes les mailles couvrant la région Bourgogne Franche-Comté, nous avons appliqué le modèle de stress gel selon le même principe exposé à la figure 3.3. La surface rouge sur la figure représente le risque qui se compose ici de deux dimensions à savoir le nombre et l'intensité des événements 'stress gel'. Décomposer ce risque selon ces deux métriques peut être un moyen d'analyser finement les modifications de sa structure et indirectement les modifications des températures hivernales avec le réchauffement. Comme pour les précipitations, le risque gélif est composé de zéros exacts avec une distribution continue fortement asymétrique et une queue de distribution plus ou moins épaisse. Il est difficile de modéliser statistiquement un mélange de distributions discrètes et continues.

Parmi les modèles statistiques candidats figure le modèle de Tweedie proposé et adapté par DUNN (2004). J'ai appliqué ce modèle aux risques gélifs afin d'estimer simultanément l'occurence et l'intensité moyennes d'événements 'stress gel'. Considérons qu'un événement

stress gel j ait une certaine intensité I_j, et que chaque I_j suit une distribution $Gamma(-\alpha, \gamma)$ (avec comme moyenne $-\alpha\gamma$ et comme variance $-\alpha\gamma^2$). Considérons ensuite que le nombre d'événements 'stress gel' au cours de l'hiver est N et suit une distribution de Poisson impliquant que des hivers seront sans événement ($N = 0$). Alors le risque gélif hivernal R peut être calculé comme une somme de Poisson de variables aléatoires gamma de sorte que :

$$R = I_1 + I_2 + \cdots + I_N \tag{3.2}$$

où N est distribué selon un loi de Poisson de moyenne λ.

La distribution du risque gélif R peut être déduite de fonctions génératrices cumulatives (Smyth 1996) en notant que R sachant N suit une distribution $Gamma(-N\alpha, \gamma)$. La fonction de probabilité qui en résulte est compliquée et ne peut pas être écrite sous une forme complètement aboutie. Je renvoie à la lecture de Dunn et Smyth (2005) pour plus de détails sur le formalisme mathématique et les méthodes de résolution numérique. Le modèle ajuste significativement ($p < 0.01$) les distributions du stress gel (T. Castel et al. 2014). Les distributions du stress gel sont de part et d'autre de la rupture différentes. On observe une diminution du nombre d'hivers sans stress et une queue de distribution moins épaisse (i.e. moins de valeurs 0) et moins de valeurs extrêmes au delà de 1987/1988. Les résultats de décomposition du risque sont présentés à la figure 3.4 avec au premier plan l'évolution du nombre des événements moyens par hiver. On constate une augmentation d'événements gélifs avec le réchauffement d'autant plus importante que R_{max} est faible. Ainsi pour $-13°C$ de résistance seuil on passe d'une moyenne d'environ 2 évènements de stress gel par hiver à presque 3 au cours de la période 1988-2015. L'augmentation est moins importante pour $-23°C$ de R_{max} mais suit la même tendance. Dans les deux cas, cette augmentation est statistiquement significative. À l'opposé, on observe une diminution significative de l'intensité moyenne d'un événement (encart de la figure 3.4) et cela pour les deux résistances seuil. Là aussi la diminution est plus marquée pour un R_{max} de $-13°C$. Ces résultats confirment la modification de la structure du risque gélif suite au réchauffement. Ils permettent également de montrer que le risque gélif ne disparaît pas.

La géographie montre que l'augmentation du nombre d'événements est généralisée sur toute la région en étant plus marquée sur les reliefs (T. Castel et al. 2019). Une diminution de l'intensité est quasi généralisée excepté pour une petite partie de la frange occidentale. On ne retrouve pas de structuration liée au relief même si les plus fortes diminutions sont localisées sur quelques mailles du Jura. Cette géographie plus complexe semble être plus liée aux spécificités climatiques locales qui déterminent l'organisation spatiale des températures minimales.

Ces travaux confirment partiellement, avec l'augmentation du nombre d'événements gélifs, le paradoxe du climat qui se réchauffe tel qu'avancé par Ball et al. (2012). L'augmentation de la température a perturbé le mécanisme d'endurcissement et de désendurcissement au froid. Comme le réchauffement concerne plus les températures diurnes (ou maximales) qui pilotent l'acclimatation (via la température moyenne), la vulnérabilité a été plus fortement modifiée que l'aléa climatique. Ainsi, la faible augmentation de la température minimale combinée à une plus grande vulnérabilité est probablement à l'origine du plus grand nombre d'événements gélifs. Des hivers moins "rudes" en termes d'extrema des températures minimales ont conduit d'un autre côté à une baisse de l'intensité du stress gel. La balance est en faveur d'une diminution globale de la valeur moyenne du stress gel en lien avec la forte diminution de l'intensité des événements. Toutefois, cela masque une évolution subtile et complexe du risque gélif et au delà des températures. Cette complexité est le fruit d'un équilibre dynamique et d'une combinaison intime entre les traits de la culture et ceux du climat. La géographie de l'évolution du risque gélif en est une des illustrations et plaide pour produire une information climatique régionalisée robuste à l'échelle des territoires.

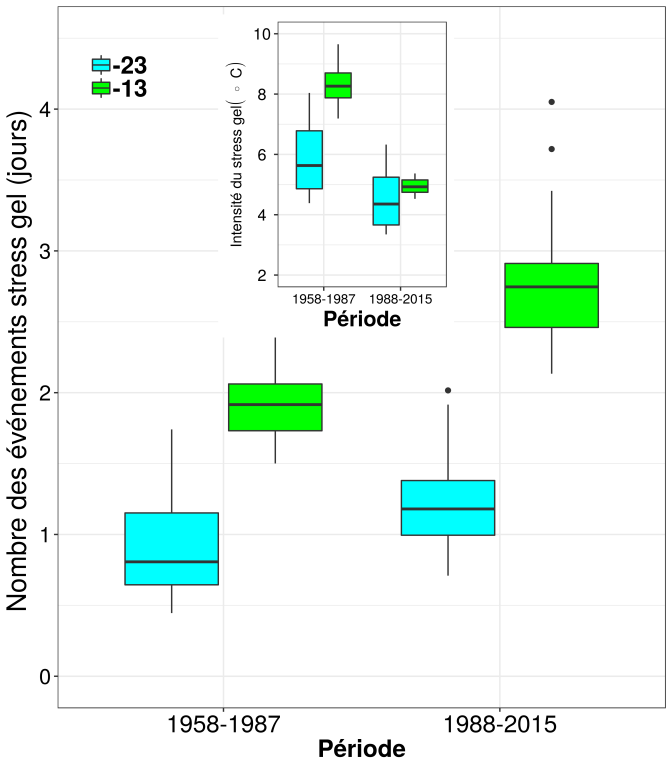


FIGURE 3.4 – Boites à moustaches de l'évolution moyenne du nombre d'événements gélifs entre les deux périodes et pour les R_{max} de $-13°C$ (couleur verte) et $-23°C$ (couleur cyan). L'encart présente l'évolution de l'intensité moyenne d'un événement. Ces variables ont été inférées à partir des distributions de Tweedie ajustées, d'après T. CASTEL et al. (2019).

3.4 Perceptions du réchauffement climatique

Je voudrais rapidement aborder cet aspect selon deux angles. Le premier en lien avec la rupture détectée sur les températures. Le deuxième sous l'angle de la perception à l'échelle des territoires.

Un point qui me surprend régulièrement lorsque je présente notre lecture du réchauffement climatique est la rupture de 1987/1988 et les réactions diverses que cela suscite. Une première réaction peut se résumer par la question suivante : *"mais que s'est-il passé en 1987/1988 ?"*. Je n'ai pas une réponse complètement consolidée à apporter sur les mécanismes et leurs enchaînements qui expliqueraient cet événement. Par contre, un faisceau d'éléments nous permettent de brosser un portrait non abouti. Parmi les multiples causes citons (BRULEBOIS et al. 2015) :

— l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre, entraînant une augmentation progressive du forçage radiatif ;

— la réduction des émissions d'aérosols en Europe au cours des années 1980 a entraîné une plus grande transparence de l'atmosphère, permettant ainsi à une plus grande quantité de rayonnement solaire d'atteindre la surface ;

— le passage de la phase négative de la NAO [4] au cours des années précédant 1988 à la persistance de conditions positives de la NAO entre 1988 et 1994 ;

— la persistance de la phase positive de l'AMO [5] depuis 1995.

Le fait que l'augmentation soit plus importante et la rupture plus marquée pour les températures maximales, et sachant que l'activité solaire est à cette période au creux d'un

4. North Atlantic Oscillation
5. Atlantic Multi-decadal Oscillation

de ses cycles de 11 ans, il est clair que les aérosols ont joué un rôle 'écran' clé. Cela a conjointement participé avec les forçages naturels (phases négatives de l'AMO et dans une moindre mesure de la NAO) à l'effet 'retard' de l'expression du réchauffement climatique. Cet effet est à l'origine du 'rebond' de 1987/1988 après le refroidissement qui a suivi l'éruption d'El Chichon (Reid et al. 2016) et la réduction des concentrations d'aérosols en Europe à partir de ∼1982 (Turnock et al. 2015). La contribution relative de chaque facteur de forçage n'est néanmoins pas claire. Les nouvelles générations de modèles pourraient permettre de mieux mimer ce changement abrupt de régime et de désintriquer la part relative de chaque facteur.

Une autre réaction vient entre autres de collègues climatologues qui ne sont pas 'convaincus' et sont plutôt sur une lecture d'un réchauffement tendanciel. Une de leur critique concerne la stationnarité de part et d'autre de la rupture (figure 3.1) qui laisserait à penser que l'augmentation des températures est terminée et donnerait prise au climato-scepticisme. Tout d'abord il faut rappeler que si le changement climatique induit par l'homme est manifeste, à tout moment et surtout localement il peut être masqué par la variabilité naturelle, que ce soit à l'échelle inter-annuelle (El Niño) ou (multi)décennale (AMO, PDO [6]). C'est possiblement ce qui s'est passé suite à la rupture au cours des années 1990. Pour la décennie suivante on parle d'une période de hiatus avec une faible augmentation ou même une tendance légèrement négative pour les températures de surface (Meehl et al. 2011). Ce hiatus a été relié à une absorption plus importante de chaleur par l'océan profond (au delà de 300m). Des résultats récents étendent ce hiatus jusqu'en 2012 et l'attribuent à une plus faible sensibilité du climat au forçage radiatif (Modak et Mauritsen 2021). Enfin, l'actualisation des séries des températures, comme mentionnée précédemment, montre qu'un nouveau pallier dans le réchauffement est en train d'être franchi depuis 2013/2014.

Le changement de température qui s'est produit en 1987/1988 peut donc être considéré comme le principal facteur de déclenchement d'une cascade de changements environnementaux abrupts. Le déclin des populations d'amphibiens et de reptiles et les changements dans la répartition altitudinale des oiseaux au Costa-Rica (Pounds et al. 1999) ou encore le déplacement des truites brunes vers de plus hautes altitudes dans les Alpes (Hari et al. 2006) sont des exemples parmi d'autres, cités précédemment, qui viennent renforcer notre analyse.

Une troisième réaction de publics assez âgés d'agriculteurs par exemple ou d'autres professions en prise avec le climat, montre que la rupture fait écho à leur vécu. Par exemple une réaction est : *"en effet depuis cette période on a beaucoup moins de neige"*. La présentation de la rupture donne prise au passé qui peut être utilisé comme levier pour relier les savoirs de la science de climats et les savoirs profanes (Petit et al. 2020). L'interdisciplinarité avec les sociologues développée dans le projet HYCCARE-Bourgogne (Tissot et al. 2016) nous a conduit à développer par une approche réflexive sur l'idée que les proxys peuvent favoriser le rapprochement entre les savoirs du climat d'échelle large et les savoirs locaux et d'expériences. Les proxys incarnent et situent localement les effets du changement climatique. Plus celui-ci est situé dans le temps et dans l'espace, plus les gens relient leur expérience et leurs savoirs à cette variabilité alors que le climat global nous dépasse et nous échappe (Petit et al. 2020). Ainsi le changement climatique n'est plus seulement un risque mais renvoie à une diversité de perceptions et à des histoires multiples. Si l'adaptation est vue comme un processus de transformation de la société et non un ajustement à des risques à mieux caractériser (Bassett et Fogelman 2013), les acteurs locaux et leurs savoirs prennent une place nouvelle.

Nous avons récemment poursuivi notre approche interdisciplinaire dans le cadre du projet ELVITA [7] (2020-2021) sur les impacts des générateurs anti-grêles à l'échelle régionale ayant suscité un conflit vif entre éleveurs et viticulteurs en Saône-et-Loire (Petit et al. 2023). Ce travail s'est inscrit dans la lignée des débats qui subsistent sur les impacts de l'ingénierie climatique à l'échelle nationale ou de la géo-ingénierie de plus en plus discutée en relation avec l'atténuation du changement climatique mondial. Ce projet m'a conduit à encadrer Mamadou

6. Pacific Decadal Oscilation
7. ÉLevage VITiculture et Adaptation au changement climatique

Traoré (Traoré 2021) pour son stage de Master 2 TMEC [8].

Nous venons début 2023 de déposer, suite à un appel d'offre de la MSA [9], un projet TRAVERSER [10] qui vient d'être présélectionné. L'objectif est de comprendre et mettre en commun l'épreuve multidimensionnelle que représente le changement climatique (les sécheresses en particulier) et ses impacts sur le travail et la santé mentale des éleveurs de bovins en filières lait et viande en Bourgogne-Franche-Comté.

Le décloisonnement et l'hybridation entre champs disciplinaires ne sont pas faciles. Je me suis engagé à différents niveaux dans cette voie afin d'apporter à mon échelle un éclairage utile sur différentes facettes du climat, du changement climatique et de ses effets. Le croisement entre régionalisation dynamique du climat et modèles d'impacts est le troisième et dernier volet que je souhaite développer.

Références

Abarca-Del-Rio, R. et O. Mestre (2006). "Decadal to secular time scales variability in temperature measurements over France". In : *Geophysical Research Letters* 33.13. ISSN : 1944-8007. DOI : 10.1029/2006GL026019. URL : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2006GL026019.

Augspurger, C. K. (2013). "Reconstructing patterns of temperature, phenology, and frost damage over 124 years: Spring damage risk is increasing". In : *Ecology* 94.1, p. 41-50. DOI : 10.1890/12-0200.1. URL : https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1890/12-0200.1.

Ball, M. C., D. Harris-Pascal, J. J. G. Egerton et T. Lenné (2012). "The paradoxical increase in freezing injury in a warming climate: frost as a driver of change in cold climate vegetation". In : sous la dir. de K. B. Storey et K. K. Tanino. T. 3. CABI Climate Change Series. CABI, p. 179-185. DOI : 10.1079/9781845938222.0179.

Bassett, T. J. et C. Fogelman (2013). "Déjà vu or something new? The adaptation concept in the climate change literature". In : *Geoforum* 48, p. 42-53. ISSN : 0016-7185. DOI : 10.1016/j.geoforum.2013.04.010. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016718513000821.

Beaugrand, G. (2004). "The North Sea regime shift: Evidence, causes, mechanisms and consequences". In : *Progress in Oceanography*. Regime shifts in the ocean. Reconciling observations and theory 60.2, p. 245-262. ISSN : 0079-6611. DOI : 10.1016/j.pocean.2004.02.018. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079661104000308.

Beaugrand, G., M. Edwards, K. Brander, C. Luczak et F. Ibanez (2008). "Causes and projections of abrupt climate-driven ecosystem shifts in the North Atlantic". In : *Ecology Letters* 11.11, p. 1157-1168. ISSN : 1461-0248. DOI : https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01218.x. URL : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1461-0248.2008.01218.x.

Brulebois, E., T. Castel, Y. Richard, C. Chateau-Smith et P. Amiotte-Suchet (2015). "Hydrological response to an abrupt shift in surface air temperature over France in 1987/88". In : *Journal of Hydrology* 531, p. 892-901. ISSN : 0022-1694. DOI : http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.026. URL : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415007945.

Cannell, M. G. R. et R. I. Smith (1986). "Climatic Warming, Spring Budburst and Forest Damage on Trees". In : *Journal of Applied Ecology* 23.1, pp. 177-191. ISSN : 00218901. URL : http://www.jstor.org/stable/2403090.

Castel, T, C Lecomte, Y Richard, I Lejeune-Hénaut et A Larmure (2017). "Frost stress evolution and winter pea ideotype in the context of climate warming at a regional scale". In : *OCL* 24.1, p. D106. DOI : 10.1051/ocl/2017002. URL : https://doi.org/10.1051/ocl/2017002.

Castel, T., C. Lecomte, Y. Richard, I. Lejeune-Henaut et A. Larmure (2019). "Évolution rétrospective du risque gélif hivernal en climat tempéré suite au réchauffement climatique". In : *Bourgogne-Franche-Comté Nature* 29, p. 325-334. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02185069.

Castel, T., C. Lecomte, Y. Richard, I. Lejeune-Hénaut et A. Larmure (2014). "Le réchauffement climatique diminue-t-il le risque de dégâts par le gel pour les cultures de climat tempéré ?" In : *27ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Sous la dir. de P. Camberlin & Y. Richard. 7 pages. Dijon, France : Association Internationale de Climatologie, p. 271-277. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01117037.

8. Transport, Mobilité, Environnement, Climat
9. sécurité sociale agricole
10. TRAVail en élevage, Épreuves et Ressources face à la SÉcheresse en Région Bourgogne-Franche Comté

Cornes, R. C., G. van der Schrier, E. J. M. van den Besselaar et P. D. Jones (2018). "An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Data Sets". In : *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 123.17, p. 9391-9409. ISSN : 2169-8996. DOI : 10.1029/2017JD028200. URL : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2017JD028200.

Cuccia, C. (2008). "Changements climatiques observés en Bourgogne depuis 1961 : Étude des variations de températures et de précipitations". Master 2 GéoBiosSphère. Université de Bourgogne, 52p.

Cuccia, C., B. Bois, Y. Richard, A. K. Parker, I. G. de Cortázar-Atauri, C. van Leeuwen et T. Castel (302014). "Phenological model performance to warmer conditions: application to Pinot noir in Burgundy". In : *OENO One* 48.3, p. 169-178. ISSN : 2494-1271. DOI : 10.20870/oeno-one.2014.48.3.1572. URL : https://oeno-one.eu/article/view/1572.

Daly, C., D. R. Conklin et M. H. Unsworth (2010). "Local atmospheric decoupling in complex topography alters climate change impacts". In : *International Journal of Climatology* 30.12, p. 1857-1864. ISSN : 1097-0088. DOI : 10.1002/joc.2007. URL : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.2007.

Donnelly, A., T. Cooney, E. Jennings, E. Buscardo et M. Jones (2009). "Response of birds to climatic variability; evidence from the western fringe of Europe". In : *International Journal of Biometeorology* 53.3, p. 211-220. ISSN : 1432-1254. DOI : 10.1007/s00484-009-0206-7. URL : https://doi.org/10.1007/s00484-009-0206-7.

Duc, G. et al. (2010). "Potentiels et leviers pour développer la production et l'utilisation des protéagineux dans le cadre d'une agriculture durable en Bourgogne". In : *Innovations Agronomiques* 11, p. 157-173. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01173204.

Dunn, P. K. (2004). "Occurrence and quantity of precipitation can be modelled simultaneously". In : *International Journal of Climatology* 24.10, p. 1231-1239. ISSN : 1097-0088. DOI : 10.1002/joc.1063. URL : http://dx.doi.org/10.1002/joc.1063.

Dunn, P. K. et G. K. Smyth (2005). "Series evaluation of Tweedie exponential dispersion model densities". In : *Statistics and Computing* 15.4, p. 267-280. ISSN : 1573-1375. DOI : 10.1007/s11222-005-4070-y. URL : https://doi.org/10.1007/s11222-005-4070-y.

Figura, S., D. M. Livingstone, E. Hoehn et R. Kipfer (2011). "Regime shift in groundwater temperature triggered by the Arctic Oscillation". In : *Geophysical Research Letters* 38.23. ISSN : 1944-8007. DOI : 10.1029/2011GL049749. URL : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2011GL049749.

Franzke, C. L. E. (2014). "Nonlinear climate change". In : *Nature Climate Change* 4.6. Number: 6 Publisher: Nature Publishing Group, p. 423-424. ISSN : 1758-6798. DOI : 10.1038/nclimate2245. URL : https://www.nature.com/articles/nclimate2245.

Hanninen, H. (2006). "Climate warming and the risk of frost damage to boreal forest trees: identification of critical ecophysiological traits". In : *Tree Physiology* 26.7, p. 889-898. DOI : 10.1093/treephys/26.7.889. URL : http://treephys.oxfordjournals.org/content/26/7/889.abstract.

Hari, R. E., D. M. Livingstone, R. Siber, P. Burkhardt-Holm et H. Güttinger (2006). "Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams". In : *Global Change Biology* 12.1, p. 10-26. ISSN : 1365-2486. DOI : 10.1111/j.1365-2486.2005.001051.x. URL : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2486.2005.001051.x.

Hengl, T. (2006). "Finding the right pixel size". In : *Computers & Geosciences* 32.9, p. 1283-1298. ISSN : 0098-3004. DOI : 10.1016/j.cageo.2005.11.008. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300405002657.

Hengl, T., G. B. M. Heuvelink et D. G. Rossiter (2007). "About regression-kriging: from equations to case studies". In : *Computers & Geosciences* 33, p. 1301-1315.

IPCC (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Rapp. tech. 104 pp. Core Writing Team, Pachauri, R.K et Reisinger, A. (eds.), IPCC, Geneva, Switzerland,

Joly, D., T. Castel, B. Pohl et Y. Richard (2018). "Influence of spatial information resolution on the relation between elevation and temperature". In : *International Journal of Climatology* 38.15, p. 5677-5688. DOI : 10.1002/joc.5771. URL : https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.5771.

Kemp, P. R., J. M. Cornelius et J. F. Reynolds (1994). "Temporal discontinuities in precipitation in the central north american prairie". In : *International Journal of Climatology* 14.5, p. 539-557. ISSN : 1097-0088. DOI : 10.1002/joc.3370140505. URL : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.3370140505.

Laat, A. T. J. de et M. Crok (2013). "A Late 20th Century European Climate Shift: Fingerprint of Regional Brightening?" In : *Atmospheric and Climate Sciences* 3.3. DOI : 10.4236/acs.2013.33031.

Lamichhane, J. R. (2021). "Rising risks of late-spring frosts in a changing climate". In : *Nature Climate Change* 11.7. Number: 7 Publisher: Nature Publishing Group, p. 554-555. ISSN : 1758-6798. DOI : 10.1038/s41558-021-01090-x. URL : https://www.nature.com/articles/s41558-021-01090-x.

Laurent, L., U. Albin et T. Castel (2023). "How abrupt changes in surface temperature impacts water cycle over France? The case study of winter bread wheat area". In : *Total Environment Research Themes*, Submitted.

Lecomte, C., A. Giraud et V. Aubert (2003). "Testing a predicting model for frost resistance of winter wheat under natural conditions". In : *Agronomie* 23.1, p. 51-66. DOI : 10.1051/agro:2002068. URL : https://doi.org/10.1051/agro:2002068.

Marteau, R., Y. Richard, B. Pohl, C. Smith Chateau et T. Castel (2015). "High-resolution rainfall variability simulated by the WRF RCM: application to eastern France". In : *Climate Dynamics* 44.3, p. 1093-1107. ISSN : 1432-0894. DOI : 10.1007/s00382-014-2125-5. URL : https://doi.org/10.1007/s00382-014-2125-5.

Marty, C. (2008). "Regime shift of snow days in Switzerland". In : *Geophysical Research Letters* 35.12. ISSN : 1944-8007. DOI : 10.1029/2008GL033998. URL : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2008GL033998.

Matić, F., B. Grbec et M. Morović (2011). "Indications of Climate Regime shifts in the Middle Adriatic Sea". In : *Acta Adriatica* 52.2. Publisher: Institute of Oceanography and Fisheries, p. 235-245. ISSN : 0001-5113, 1846-0453. URL : https://hrcak.srce.hr/en/89727.

Meehl, Gerald A., Julie M. Arblaster, John T. Fasullo, Aixue Hu et Kevin E. Trenberth (2011). "Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods". In : *Nature Climate Change* 1.7, p. 360-364. ISSN : 1758-678X, 1758-6798. DOI : 10.1038/nclimate1229. URL : http://www.nature.com/articles/nclimate1229.

Modak, A. et T. Mauritsen (2021). "The 2000–2012 Global Warming Hiatus More Likely With a Low Climate Sensitivity". In : *Geophysical Research Letters* 48.9, e2020GL091779. ISSN : 1944-8007. DOI : 10.1029/2020GL091779. URL : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2020GL091779.

Moisselin, J.-M., M. Schneider, C. Canellas et O. Mestre (2002). "Les changements climatiques en France au XXe siècle - Étude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations". In : *La Météorologie* 38, p. 45-56. ISSN : 2107-0830. DOI : 10.4267/2042/36233. URL : https://lameteorologie.fr/issues/2002/38/meteo_2002_38_45.

Petit, S., T. Castel, G. Henrion, Y. Richard, M. Traoré, M.-H. Vergote et J. Young (2023). "Changing local climate patterns through geo-engineering? Learning from a conflict around hail suppression systems and droughts in the Burgundy wine region of France". In : *Regional Environmental Change*, under revision, Submission EMID:7ec8b443c3a6c0e8.

Petit, S., M.-H. Vergote, T. Castel et Y. Richard (2020). "Le climat "par procuration". De l'usage des proxys pour relier les savoirs". In : *Natures Sciences Sociétés* 28.1. Number: 1 Publisher: EDP Sciences, p. 12-23. ISSN : 1240-1307, 1765-2979. DOI : 10.1051/nss/2020016. URL : https://www.nss-journal.org/articles/nss/abs/2020/01/nss200016/nss200016.html.

Pettitt, A. N. (1979). "A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem". In : *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)* 28.2. Publisher: [Wiley, Royal Statistical Society], p. 126-135. ISSN : 0035-9254. DOI : 10.2307/2346729. URL : https://www.jstor.org/stable/2346729 (visité le 05/04/2023).

Pounds, J. A., M. P. L. Fogden et J. H. Campbell (1999). "Biological response to climate change on a tropical mountain". In : *Nature* 398.6728. Number: 6728 Publisher: Nature Publishing Group, p. 611-615. ISSN : 1476-4687. DOI : 10.1038/19297. URL : https://www.nature.com/articles/19297.

Reid, P. C. et G. Beaugrand (2012). "Global synchrony of an accelerating rise in sea surface temperature". In : *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 92.7. Publisher: Cambridge University Press, p. 1435-1450. ISSN : 0025-3154, 1469-7769. DOI : 10.1017/S0025315412000549. URL : https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-the-marine-biological-association-of-the-united-kingdom/article/abs/global-synchrony-of-an-accelerating-rise-in-sea-surface-temperature/1B0E66D89B7D26511911D5B17F401843.

Reid, P. C. et al. (2016). "Global impacts of the 1980s regime shift". In : *Global Change Biology* 22.2, p. 682-703. ISSN : 1365-2486. DOI : 10.1111/gcb.13106. URL : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.13106.

Richard, Y., T. Castel, B. Bois, C. Cuccia, R. Marteau, A. Rossi, D. Thévenin et H. Toussaint (2014). "Évolution des températures observées en Bourgogne (1961-2011)". In : *Bourgogne Nature* 19, p. 110-117.

Rixen, C., M. A. Dawes, S. Wipf et F. Hagedorn (2012). "Evidence of enhanced freezing damage in treeline plants during six years of CO2 enrichment and soil warming". In : *Oikos* 121.10, p. 1532-1543. ISSN : 1600-0706. DOI : 10.1111/j.1600-0706.2011.20031.x. URL : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1600-0706.2011.20031.x.

Ruggieri, E. (2013). "A Bayesian approach to detecting change points in climatic records". In : *International Journal of Climatology* 33.2, p. 520-528. ISSN : 1097-0088. DOI : 10.1002/joc.3447. URL : http://dx.doi.org/10.1002/joc.3447.

Sierra-Almeida, A., L. A. Cavieres et L. A. Bravo (2018). "Warmer Temperatures Affect the in situ Freezing Resistance of the Antarctic Vascular Plants". In : *Frontiers in Plant Science* 9. ISSN : 1664-462X. URL : https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2018.01456.

Smyth, G. K. (1996). "Regression modelling of quantity data with exact zeroes". In : *Proceedings of the Second Australia-Japan Workshop on Stochastic Models in Engineering, Technology and Management.* University of Queensland, p. 572-580.

Tissot, A.-C. et al. (2016). *HYdrologie, Changement Climatique, Adaptation, Ressource en Eau en Bourgogne (HYCCARE).* Rapport final Programme GICC. Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, p. 115.

Traoré, M. (2021). "Analyse comparative des précipitations et d'épisodes de sécheresse. Effet de l'installation de générateurs anti-grêle". Master 2 TMEC. Université de Bourgogne, 73p.

Turnock, S. T. et al. (252015). "Modelled and observed changes in aerosols and surface solar radiation over Europe between 1960 and 2009". In : *Atmospheric Chemistry and Physics* 15.16. Publisher: Copernicus GmbH, p. 9477-9500. ISSN : 1680-7316. DOI : 10.5194/acp-15-9477-2015. URL : https://acp.copernicus.org/articles/15/9477/2015/.

Ubertosi, M. et al. (2022). "PSDR4 ProSys - L'adaptation pédoclimatique, les impacts environnementaux et la valeur économique de nouveaux systèmes de culture durables producteurs de protéines en Bourgogne-Franche-Comté". In : *Innovations Agronomiques* 86, p. 173-189. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-03686545.

Xiao, D., J. Li et P. Zhao (2012). "Four-dimensional structures and physical process of the decadal abrupt changes of the northern extratropical ocean–atmosphere system in the 1980s". In : *International Journal of Climatology* 32.7, p. 983-994. ISSN : 1097-0088. DOI : 10.1002/joc.2326. URL : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.2326.

Zeileis, A., C. Kleiber, W. Krämer et K. Hornik (2003). "Testing and dating of structural changes in practice". In : *Computational Statistics & Data Analysis*. Special Issue in Honour of Stan Azen: a Birthday Celebration 44.1, p. 109-123. ISSN : 0167-9473. DOI : 10.1016/S0167-9473(03)00030-6. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167947303000306.

Chapitre 4

Modifications de la variabilité climatique régionale

■ *La connaissance progresse en intégrant en elle l'incertitude, non en l'exorcisant.* ■

Edgard Morin
La méthode

Sommaire

4.1 Cadre et problématique des travaux 37
4.2 Qualité de la régionalisation des CCSM4-CMIP5 débiaisées 39
4.3 Projection régionalisée du stress gel 40
4.4 Nouvelle stratégie de régionalisation : piste envisagée 41

4.1 Cadre et problématique des travaux

Parler de "*changement climatique*" ou de "*changement de la variabilité climatique*" ressemble à première vue à une tautologie puisque c'est dans la nature même du système climatique que d'être en perpétuelle évolution. Pourtant, ce qui est inédit – à l'échelle de l'humanité – ce sont les modalités du changement déclenché par le développement de nos sociétés. Passer d'une concentration de dioxyde de carbone (CO_2) de 278 ppm à l'ère pré-industrielle aux 421 ppm actuels (enregistrée à l'observatoire du Mauna Loa en mars 2023) en seulement 200 ans est sans précédent (Eyring et al. 2021). Ce niveau de concentration n'a pas été atteint depuis 3 millions d'années et depuis l'histoire des espèces modernes et des civilisations agricoles (Burke et al. 2018). Nous conduisons " *une expérience unique, globale et irréversible à l'échelle humaine*[1]" qui potentiellement peut faire basculer le climat et l'humanité. Par leur menace de changements abrupts et irréversibles, les points de bascule sont trop risqués pour que l'on parie contre eux (Lenton et al. 2019). Tout en essayant de limiter au maximum l'accumulation de CO_2 dans l'atmosphère, l'irréversibilité du changement climatique oblige nos sociétés à se préparer (Solomon et al. 2009). Sachant qu'il est peu probable que le réchauffement soit contenu en deçà des 2°C à l'horizon 2100 (Raftery et al. 2017) et que les anomalies extrêmes (i.e. températures de 2003 en France) sont induites par ce réchauffement (Hansen et al. 2012) quels seront les changements du climat d'une région et pour quelles conséquences sur les composantes d'un territoire donné ?

Se fier aux statistiques du climat passé n'est plus un guide utile pour l'avenir (Lettenmaier et al. 2009). Il faut s'en remettre aux modèles de climat et aux expériences numériques d'intercomparaison (CMIP[2]) qui alimentent les rapports du GIEC. Le bureau du GIEC promeut la même descente d'échelle pour accorder plus d'attention aux dimensions nationale, régionale et locale du changement climatique (De Pryck 2022).

Cette dernière partie de mon mémoire s'inscrit pleinement dans ce contexte et se veut être le creuset des deux parties précédentes. Les travaux que je conduis et que je cherche à développer dans cet axe sont dépendants des avancées et de la robustesse des résultats exposés dans les deux parties précédentes. Dès le départ j'ai inscrit mes travaux dans l'objectif de qualifier les modifications de la variabilité climatique à des échelles opératoires et pour les futurs possibles du climat. Ces futurs possibles sont abordés par l'intermédiaire des trajectoires de forçages radiatifs que le système climatique est susceptible d'emprunter. En fonction du chemin suivi, la gamme des conséquences sur la variabilité climatique et les risques encourus pour un territoire sera plus ou moins importante. Cette incertitude dépend directement de notre capacité ou incapacité à réduire nos émissions de gaz à effet de serre. A cela s'ajoute l'incertitude de la variabilité interne du système climatique et celles de la modélisation (Hawkins et Sutton 2011).

Pour les températures et les précipitations hivernales et estivales projetées, à partir des données CMIP5 sur la France, l'incertitude en fin du XXI^{e} siècle est due principalement à la trajectoire suivie et au modèle utilisé (Terray et Boé 2013). Le poids relatif de chacune de ces sources d'incertitude varie également en fonction de l'horizon de temps et de l'espace géographique considéré. Plus l'horizon de temps est court, plus la part de la variabilité interne sera importante comparativement à celle de la trajectoire (i.e. scénario de forçage radiatif). A un horizon de 20 à 30 ans il n'y a pas/peu d'effet de la trajectoire en raison de l'inertie du système (Evin et al. 2021 ; Hawkins et Sutton 2011).

L'initiative CORDEX[3] coordonne les efforts internationaux de la communauté scientifique pour évaluer les effets régionaux du changement climatique. La mutualisation de ces efforts est indispensable eu égard au coût de calcul et dans l'idée de fournir une estimation robuste

1. J'emprunte ces termes à Jean-Marc Jancovici
2. Coupled Model Intercomparison Project
3. Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment

des changements climatiques et des incertitudes. Avec les simulations centrées sur l'Europe (EURO-CORDEX), "l'effet trajectoire" sur l'incertitude des températures est prégnant en fin de siècle. Pour les pluies, l'incertitude est dominée en premier lieu par "l'effet modèle" (global comme régional) alors que "l'effet trajectoire" a un poids plus important sur les incertitudes associées aux pluies hivernales (Evin et al. 2021). L'étude très complète de ces auteurs sur le domaine EURO-CORDEX soulève un point critique lié à la nature déséquilibrée et incomplète du jeu des simulations climatiques régionales d'ensemble. Ils pointent le problème de la sous- et/ou sur-représentation de certains modèles globaux et/ou régionaux qui biaisent les estimations. Ils proposent également des pistes pour améliorer la fiabilité des informations sur le changement climatique régional à destination des communautés scientifiques et des utilisateurs. En particulier, en sélectionnant soigneusement des modèles régionaux et globaux plausibles tout en favorisant leur diversité en termes de réponses aux changements climatiques à l'échelle régionale. On se heurte, là aussi, à un problème de crédibilité de certaines simulations régionales qui bruitent l'analyse du signal climatique projeté. Boé et al. (2020) ont également montré de grandes divergences entre les modèles globaux et régionaux dans les changements climatiques estivaux projetés sur l'Europe. De telles incohérences sont problématiques pour l'analyse de l'amplitude et de la variabilité des changements climatiques. Ces auteurs pointent des limites certaines de la régionalisation dynamique et la nécessité d'être très prudents dans la projection des impacts et de leurs incertitudes à partir des données EURO-CORDEX.

Un jeu de données régionalisées DRIAS2020 (Soubeyroux et al. 2021) est disponible sur le portail DRIAS de Météo-France. Ces données sont centrées sur la Métropole à la résolution de 8km (grille SIM) et sont destinées à l'adaptation des territoires. Pour cela des simulations EURO-CORDEX ont été pré-sélectionnées (sur des critères de plausibilité et de diversité notamment) et post-corrigées par la méthode statistique ADAMONT (Verfaillie et al. 2017). Ces données sont sans contexte utiles pour évaluer les incertitudes et pour brosser une image du changement climatique en France (Dubreuil 2022). Elles jouent également un rôle dans la formation et je les utilise pour mes enseignements auprès des élèves-ingénieurs de l'Institut Agro Dijon et des Master 2 SEME [4]. La question qui se pose toutefois est : "Sommes-nous condamnés à post-corriger systématiquement les simulations climatiques avant de forcer un modèle d'impact ?". Si elles sont nécessaires, ces corrections introduisent des incertitudes supplémentaires qui ont des conséquences sur les simulations hydrologiques par exemple et nécessitent d'être prudents quant à la portée des résultats (Liu et al. 2014 ; Teng et al. 2015).

J'ai abordé les incertitudes avec la thèse de Bilel Fathilli (Fathalli 2016) que j'ai co-encadré avec Benjamin Pohl. Nous avons observé à partir d'un ensemble de 10 simulations WRF sur la période 1992-2011 que la part de la variabilité interne dans l'incertitude associée aux pluies sur la Tunisie était moindre comparativement à celle des modèles (Fathalli et al. 2018). Pour cette région, la part de la variabilité interne est la plus élevée dans l'incertitude associée aux simulations des pluies estivales. Néanmoins, dans le cadre de la régionalisation des projections climatiques, je ne me suis pas engagé sur cette voie ni sur la voie du multi-modèle. Réaliser des simulations multi-membres sur l'entièreté du XXI^{e} siècle n'est pas envisageable. La configuration de régionalisation présentée au paragraphe 2.4.2 nous a ouvert des perspectives pour régionaliser les projections climatiques. Dans l'expérience conduite, le modèle WRF a été forcé par des données globales (CCSM4 [5]-CMIP5) spécialement débiaisées pour la régionalisation dynamique (Bruyère et al. 2014 ; Monaghan et al. 2014). Je présente dans la suite la qualité de la régionalisation produite et l'utilisation de ces données pour la projection du stress gel. Les perspectives quant à la désagrégation dynamique d'un

4. Sol Eau Milieux Environnement

5. Community Climate System Model développé par le National Center for Atmospheris Research, Boulder Colorado, USA

ensemble CMIP6 corrigé des biais seront succinctement exposées.

4.2 Qualité de la régionalisation des CCSM4-CMIP5 débiaisées

Ce travail a été développé lors de ma participation aux projets ANR CoSAC et PSDR/Prosys. Pour ce dernier j'ai pu employer Etienne Brulebois (post-doctorat de 6 mois) qui a mené les premières évaluations de ces données régionalisées. Valentin Blanchet mobilise également ces données pour sa thèse qui est financée par le projet régional PubPrivLand. Les données CCSM4-CMIP5 débiaisées ont été utilisées pour forcer WRF sur la période dite historique (1979-2005). Ces simulations (CCSM4/WRF) ont ensuite été comparées avec les données SIM (i.e. référence climatique) et les données ERAINTERIM désagrégées par WRF selon la même configuration. Notez que l'année 1979 est considérée comme une année de "spin-up" et n'a pas été utilisée pour la comparaison présentée à la figure 4.1.

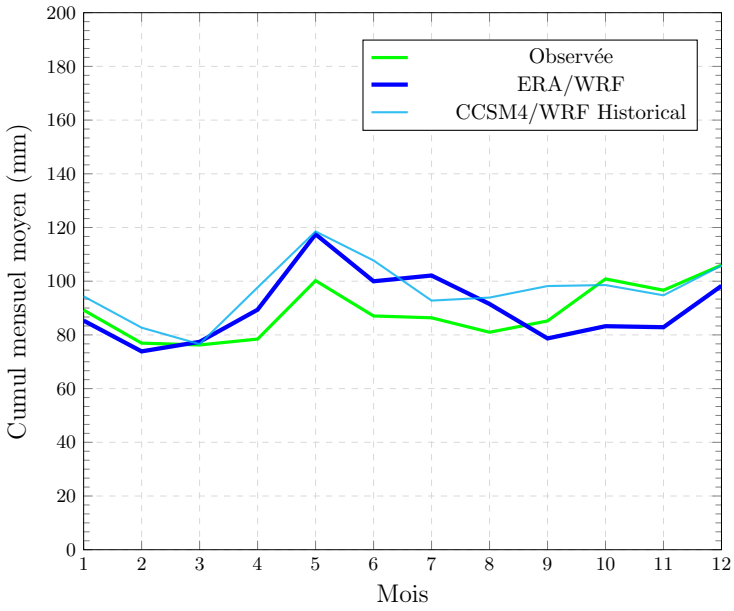


FIGURE 4.1 – Cycle annuel moyen calculée pour la période 1980-2005 et pour les trois jeux de données SIM (Observées – trait vert), ERA/WRF (simulées – trait bleu) et CCSM4/WRF (simulées – trait cyan). La moyenne est calculée à partir de l'ensemble des points de la grille (8km) qui couvre la région Bourgogne Franche-Comté.

Les résultats montrent que les cycles annuels simulés par ERA/WRF et CCSM4/WRF sont proches. Les simulations reproduisent le pic du mois de mai en le sur-estimant et ont tendance à quasi systématiquement sur-estimer les cumuls excepté d'octobre à décembre. Ces résultats confirment à la fois la nouvelle configuration présentée au paragraphe 2.4.2 et également la qualité des données de forçage CCSM4-CMIP5 débiaisées. La comparaison a été affinée en utilisant ces jeux de données pour forcer le modèle BILJOU© sur les 30 parcelles de pins Douglas (cf. figure 2.3). Le modèle a besoin, pour simuler le bilan hydrique sous couvert forestier, des données de précipitations ainsi que des variables nécessaires pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP). Les résultats présentés à la figure 4.2 montrent que les indices de stress simulés à partir des différentes données climatiques sont dans la même gamme de valeurs, et ce malgré un cycle annuel qui sur-estime les précipitations en période estivale. Ces "très bons" résultats apparents sont surprenants en première lecture. La post-correction des précipitations et des températures par Quantile-Mapping (selon l'approche proposée par BOÉ et al. 2007) au pas de temps mensuel dégrade de manière surprenante les résultats. L'analyse montre que les indices de stress sont bien reproduits à partir des données ERA/WRF et CCSM4/WRF pour des "mauvaises raisons". En effet, BLANCHET

et al. (2022) ont montré qu'il y avait une compensation entre biais des précipitations estivales et rayonnement. La sur-estimation du rayonnement au cours de la période estivale conduit à une sur-estimation de l'ETP qui "absorbe" les sur-précipitations. L'application de la post-correction du rayonnement confirme cela.

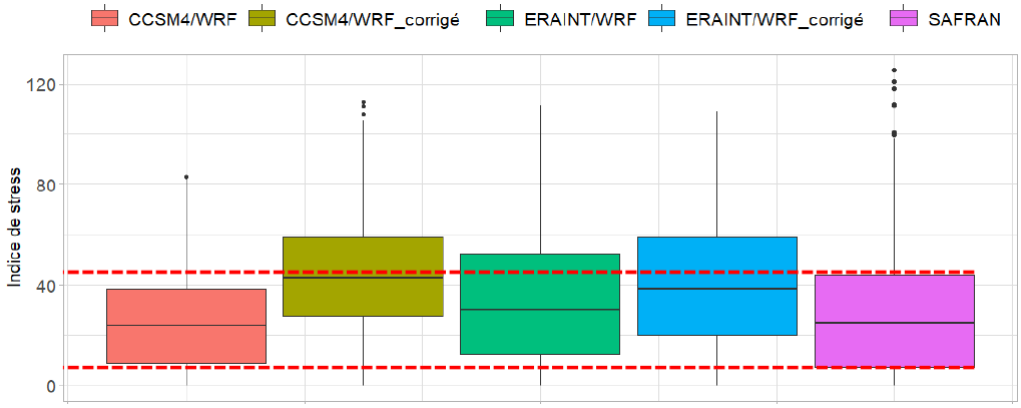


FIGURE 4.2 – Indice de stress calculé par le modèle BILJOU© pour les 30 parcelles de pins Douglas. Pour chaque parcelle les données climatiques sont fournies par le point de grille le plus proche. Les données climatiques utilisées pour forcer le modèle BILJOU© sont : SIM (i.e. SAFRAN – fuchsia dont les données marquent les limites en pointillées du premier et du troisième quartile de l'indice de stress), ERAINT/WRF (vert) et CCSM4/WRF (rouge). Notons que pour ces deux derniers jeux de données une post-correction par quantile-mapping a été appliquée sur les précipitations et les températures (bleu et vert olive), d'après BLANCHET et al. (2022)

.

Les compensations de biais ou obtenir un résultat correct pour de "mauvaises raisons" est un point qui me questionne sur la stratégie à mener. En d'autres termes et dans une telle situation faut-il corriger les biais ou ne pas les corriger ? Cette question est reprise dans un article récent (LAUX et al. 2021) dans la perspective d'évaluer les impacts sur l'agriculture à partir de données climatiques régionalisées. La conclusion de ces auteurs ne tranche pas le débat et suggère d'appliquer un ensemble de méthodes pour corriger les biais. Pour la thèse de Valentin Blanchet l'idée est de produire la projection des indices à partir des données "brutes" et post-corrigées. Nous envisageons également d'utiliser la méthode ADAMONT voire d'autres méthodes de débiaisages complémentaires.

4.3 Projection régionalisée du stress gel

Pour les températures, ces simulations régionales montrent en moyenne une sous-estimation des températures maximales et une sur-estimation des températures minimales. Ces biais sont liés à la résolution de 12km qui tend à lisser le signal. Pour projeter le stress gel nous avons débiaisé les températures par un quantile-mapping appliqué au pas de temps mensuel (CAVAN et al. 2020). Le modèle a ensuite été forcé à partir de la régionalisation des températures selon les deux trajectoires RCP [6]4.5 et RCP8.5 (VUUREN et al. 2011). Les simulations montrent que jusqu'en 2050 le niveau de stress ne diminue pas, et ce, quelque soit la trajectoire de forçage radiatif (figure 4.3). Une diminution survient après 2050, et est plus marquée pour la trajectoire RCP8.5. Le niveau de stress diminue, mais avec une grande variabilité inter-annuelle et des risques de dégâts plus marqués pour les variétés à faible résistance maximale. Malgré le réchauffement, le niveau de stress sera jusqu'en 2050 de la même ampleur que celui observé sur la période historique. On peut également observer la présence de cycles dans l'évolution du stress. Ces cycles sont possiblement reliés à la variabilité naturelle du climat aux effets seuils induits par l'amplitude de l'augmentation projetée des températures. Notons

6. Representative Concentration Pathways

que pour la période historique, le stress gel simulé à partir du forçage CCSM4/WRF est globalement sur-estimé. Cela est dû à un biais chaud sur les températures moyennes journalières conduisant à une moins bonne acclimatation (i.e. plus grande vulnérabilité) et plus de stress.

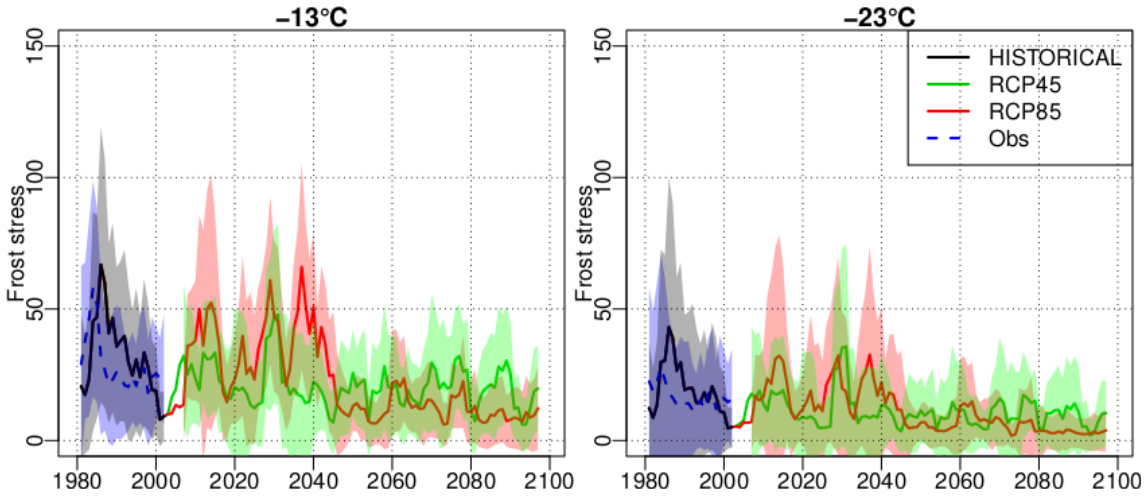


FIGURE 4.3 – Evolution du stress gel hivernal (frost stress) du pois en Bourgogne Franche-Comté pour deux températures de résistance maximale R_{max} ($-13°C$ et $-23°C$). Les simulations correspondent à plusieurs dates de semis (2, 10, 21 et 31 octobre) et plusieurs durées d'acclimatation (35 à 49 jours par pas de 2 jours). Le stress gel hivernal est évalué pour chaque hiver par la somme des différences entre la température de résistance effective journalière de la culture calculée par le modèle et la température minimale quand celle-ci est inférieure à la résistance. Évolution moyenne (en trait plein) et enveloppes des simulations réalisées en utilisant les données observées et les données simulées, d'après UBERTOSI et al. (2022).

Comparativement à la période historique, le niveau de stress projeté sur 2020-2050 a augmenté (en moyenne +5 degrés-jours cumulés). Des résultats très récents montrent que cette augmentation s'accompagne d'événements gélifs plus intenses et légèrement moins nombreux. Ce signal est à l'opposé de celui que nous avons observé (cf. figure 3.4) de part et d'autre de la rupture de 1987/1988. En postulant que la régionalisation dynamique permet de correctement mimer l'évolution du climat sur cet espace géographique, on peut alors faire l'hypothèse que cette structure du risque gélif signe un changement dans les modalités du réchauffement climatique hivernal. Le modèle de stress gel permet de 'filtrer' un signal différent dans l'augmentation des températures de celui qui a été observé au cours des 60 dernières années. La nature de ces modifications reste à préciser pour qualifier finement ce changement.

4.4 Nouvelle stratégie de régionalisation : piste envisagée

Les réanalyses ERA5 et les nouvelles projections CMIP6 suscitent de nouvelles perspectives pour la régionalisation climatique tant statistique que dynamique. Avec une résolution de 31km couvrant la période allant de 1950 à aujourd'hui, les données ERA5 permettent d'envisager des expériences numériques pour essayer de mieux comprendre la rupture de 1987/1988 ainsi que l'évolution récente observée sur les températures. Au cours de la période 2011-2020, le réchauffement observé en France (plus important que sur d'autres régions), principalement dû au forçage d'origine anthropique, a été renforcé (de l'ordre de $+0,32°C$) par la variabilité interne (RIBES et al. 2022). Ces auteurs ont dans la même étude projeté le réchauffement attendu sur la France selon une nouvelle méthode – sophistiquée et prometteuse – qui contraint les simulations CMIP6 par les observations régionales. Outre que cette approche permet de se rapprocher de l'augmentation observée sur la période récente, le réchauffement projeté dans le cas des scénarios d'émission intermédiaire (SSP2-45) et élevée (SSP5-85) conduisent à une augmentation des températures sur la France de $+3,8°C$ à $+6,7°C$ respectivement.

Ces valeurs sont supérieures à celles précédemment obtenues avec les simulations CMIP5 et EURO-CORDEX. Ces résultats suggèrent de reprendre nos analyses pour les actualiser et les préciser.

J'envisage de reprendre la stratégie de régionalisation dynamique mise en oeuvre avec les données ERA-INTERIM et CCSM4-CMIP5. Je prévois toutefois une descente d'échelle basée sur un seul grand domaine (emprise EURO-CORDEX) à la place des deux domaines emboîtés utilisés précédemment. En effet, la taille réduite du deuxième domaine a perturbé la qualité des données régionalisée notamment pour les zones proches de la limite (Castel et al. 2023). Cette descente d'échelle est rendue possible grâce à l'augmentation des capacités du centre de calcul de l'Université de Bourgogne. Cette approche est potentiellement porteuse d'améliorations (Leduc et Laprise 2009). Je conduis actuellement une comparaison sur deux années tests. Enfin, pour les projections, mon idée est de forcer WRF à partir des données d'ensemble CMIP6 débiaisées. Un nouveau jeu de données corrigé des biais fournit un forçage à grande échelle de haute qualité pour la régionalisation dynamique (Xu et al. 2021). L'approche revient en quelque sorte à inverser le paradigme "classiquement" utilisé dans les régionalisations d'ensemble de l'initiative CORDEX. La réduction des biais en amont comme avec les données CCSM4-CMIP5 (Bruyère et al. 2014 ; Monaghan et al. 2014) limite leur propagation au modèle régional et a montré une amélioration significative sur les simulations que j'ai réalisé. Peut être serait-il intéressant de combiner cette approche avec celle proposée par Ribes et al. (2022) en contraignant les simulations par les observations régionales ?

La régionalisation dynamique en continu sur plusieurs décennies permet de tracer le chemin possible (mais peu probable) qu'empruntera le climat d'un territoire donné dans les décennies à venir. Afin de dessiner les modes de variabilité et les stratégies d'adaptation, le chemin est, me semble t-il, aussi important que le point d'arrivée. Cette démarche se veut complémentaire des approches d'ensemble indispensables pour quantifier les incertitudes. Repérer des périodes charnières (ruptures/accélérations) ou des modifications de la variabilité (extrêmes) dans l'évolution du climat oblige à penser les stratégies d'adaptation en fonction. En effet, passer un seuil peut s'avérer rédhibitoire pour des systèmes de culture, des peuplements forestiers ou des cours d'eau. Cela permet également de donner prise à la perception du changement climatique et peut être un levier pour l'action.

Références

Blanchet, V., P. Amiotte-Suchet, N. Bréda, V. Badeau et T. Castel (2022). "Apport d'un nouveau protocole de régionalisation dynamique du climat pour l'estimation du bilan hydrique de douglasaies". In : *35ème colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie*. Météo-France and Université Toulouse III. Toulouse, France, 6p. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-03693215.

Boé, J., S. Somot, L. Corre et P. Nabat (2020). "Large discrepancies in summer climate change over Europe as projected by global and regional climate models: causes and consequences". In : *Climate Dynamics* 54.5, p. 2981-3002. ISSN : 1432-0894. DOI : 10.1007/s00382-020-05153-1. URL : https://doi.org/10.1007/s00382-020-05153-1.

Boé, J., L. Terray, F. Habets et E. Martin (2007). "Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies". In : *International Journal of Climatology* 27.12, p. 1643-1655. ISSN : 08998418, 10970088. DOI : 10.1002/joc.1602. URL : http://doi.wiley.com/10.1002/joc.1602.

Bruyère, C. L., J. M. Done, G. J. Holland et S. Fredrick (2014). "Bias corrections of global models for regional climate simulations of high-impact weather". In : *Climate Dynamics* 43.7, p. 1847-1856. ISSN : 1432-0894. DOI : 10.1007/s00382-013-2011-6. URL : http://dx.doi.org/10.1007/s00382-013-2011-6.

Burke, K. D., J. W. Williams, M. A. Chandler, A. M. Haywood, D. J. Lunt et B. L. Otto-Bliesner (2018). "Pliocene and Eocene provide best analogs for near-future climates". In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115.52. Publisher: Proceedings of the National Academy of Sciences, p. 13288-13293. DOI : 10.1073/pnas.1809600115. URL : https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1809600115.

Castel, T., N. Cavan, J. Pergaud, F. Angevin et N. Colbach (2023). "Resilience to climate change of innovative weed management strategies". In : *Global Change Biology*, in prep.

Cavan, N., T. Castel, J. Pergaud, F. Angevin et N. Colbach (2020). "Et demain? Robustesse des stratégies innovantes de gestion des adventices face au changement climatique". In : *Innovations Agronomiques* 81, p. 209-225. doi : 10.15454/fqye-3778. url : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-03105517.

De Pryck, K. (2022). *GIEC, la voix du climat*. Presses de Sciences Po, p. 238.

Dubreuil, V. (2022). "Le changement climatique en France illustré par la classification de Köppen". In : *La Météorologie* 116.116, p. 37-47. issn : 2107-0830. doi : 10.37053/lameteorologie-2022-0012. url : https://lameteorologie.fr/issues/2022/116/meteo_2022_116_37.

Evin, G., S. Somot et B. Hingray (2021). "Balanced estimate and uncertainty assessment of European climate change using the large EURO-CORDEX regional climate model ensemble". In : *Earth System Dynamics* 12.4, p. 1543. doi : 10.5194/esd-12-1543-2021. url : https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-03668369.

Eyring, V. et al. (2021). "Human Influence on the Climate System". In : Masson-Delmotte, V. et al. *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA : Cambridge University Press. Chap. 3, p. 423-552.

Fathalli, B. (2016). "Simulations des impacts d'un lac artificiel sur le climatd'une région aride : Exemple du Chott El Jérid au Sud de la Tunisie". Thèse de doct. Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis.

Fathalli, B., B. Pohl, T. Castel et M. J. Safi (2018). "Errors and uncertainties in regional climate simulations of rainfall variability over Tunisia: a multi-model and multi-member approach". In : *Climate Dynamics*. issn : 1432-0894. doi : 10.1007/s00382-018-4150-2. url : https://doi.org/10.1007/s00382-018-4150-2.

Hansen, J., M. Sato et R. Ruedy (2012). "Perception of climate change". In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109.37. Publisher: National Academy of Sciences Section: PNAS Plus, E2415-E2423. issn : 0027-8424, 1091-6490. doi : 10.1073/pnas.1205276109. url : https://www.pnas.org/content/109/37/E2415.

Hawkins, E. et R. Sutton (2011). "The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change". In : *Climate Dynamics* 37.1, p. 407-418. issn : 1432-0894. doi : 10.1007/s00382-010-0810-6. url : https://doi.org/10.1007/s00382-010-0810-6.

Laux, P. et al. (152021). "To bias correct or not to bias correct? An agricultural impact modelers' perspective on regional climate model data". In : *Agricultural and Forest Meteorology* 304-305, p. 108406. issn : 0168-1923. doi : 10.1016/j.agrformet.2021.108406. url : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192321000897.

Leduc, M. et R. Laprise (2009). "Regional climate model sensitivity to domain size". In : *Climate Dynamics* 32.6, p. 833-854. issn : 1432-0894. doi : 10.1007/s00382-008-0400-z. url : https://doi.org/10.1007/s00382-008-0400-z.

Lenton, T. M., J. Rockström, O. Gaffney, S. Rahmstorf, K. Richardson, W. Steffen et H. J. Schellnhuber (2019). "Climate tipping points — too risky to bet against". In : *Nature* 575.7784, p. 592-595. doi : 10.1038/d41586-019-03595-0. url : https://www.nature.com/articles/d41586-019-03595-0.

Lettenmaier, D. P., E. F. Wood, R. Pielke, K. E. Trenberth, W. B Rossow et T. Oki (2009). "Water in a Changing Climate: Challenges for GEWEX". In : *Global Energy and Water Cycle Experiment News* 19.2, p. 1-16.

Liu, M. et al. (162014). "What is the importance of climate model bias when projecting the impacts of climate change on land surface processes?" In : *Biogeosciences* 11.10. Publisher: Copernicus GmbH, p. 2601-2622. issn : 1726-4170. doi : 10.5194/bg-11-2601-2014. url : https://bg.copernicus.org/articles/11/2601/2014/.

Monaghan, A., D. Steinhoff, C. Bruyere et D. Yates (2014). "NCAR CESM Global Bias-Corrected CMIP5 Output to Support WRF/MPAS Research". In : Publisher: UCAR/NCAR - Research Data Archive type: dataset. doi : 10.5065/D6DJ5CN4. url : https://rda.ucar.edu/datasets/ds316.1/.

Raftery, A. E., A. Zimmer, D. M. W. Frierson, R. Startz et P. Liu (2017). "Less than 2 °C warming by 2100 unlikely". In : *Nature Climate Change* 7.9, p. 637-641. issn : 1758-6798. doi : 10.1038/nclimate3352. url : https://www.nature.com/articles/nclimate3352.

Ribes, A., J. Boé, S. Qasmi, B. Dubuisson, H. Douville et L. Terray (42022). "An updated assessment of past and future warming over France based on a regional observational constraint". In : *Earth System Dynamics* 13.4. Publisher: Copernicus GmbH, p. 1397-1415. issn : 2190-4979. doi : 10.5194/esd-13-1397-2022. url : https://esd.copernicus.org/articles/13/1397/2022/.

Solomon, S., G.-K. Plattner, R. Knutti et P. Friedlingstein (2009). "Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions". In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106.6, p. 1704-1709. doi : 10.1073/pnas.0812721106. url : http://www.pnas.org/content/106/6/1704.abstract.

Soubeyroux, J.-M. et al. (2021). *Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS-2020 pour la Métropole*. Rapport. Météo-France, p. 98.

Teng, J., N. J. Potter, F. H. S. Chiew, L. Zhang, B. Wang, J. Vaze et J. P. Evans (2015). "How does bias correction of regional climate model precipitation affect modelled runoff?" In : *Hydrology and Earth*

System Sciences 19.2. Publisher: Copernicus GmbH, p. 711-728. ISSN : 1027-5606. DOI : 10.5194/hess-19-711-2015. URL : https://hess.copernicus.org/articles/19/711/2015/.

TERRAY, L. et J. BOÉ (2013). "Quantifying 21st-century France climate change and related uncertainties". In : *Comptes Rendus Geoscience* 345.3, p. 136-149. ISSN : 1631-0713. DOI : http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2013.02.003. URL : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631071313000357.

UBERTOSI, M. et al. (2022). "PSDR4 ProSys - L'adaptation pédoclimatique, les impacts environnementaux et la valeur économique de nouveaux systèmes de culture durables producteurs de protéines en Bourgogne-Franche-Comté". In : *Innovations Agronomiques* 86, p. 173-189. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-03686545.

VERFAILLIE, D., M. DÉQUÉ, S. MORIN et M. LAFAYSSE (242017). "The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models". In : *Geoscientific Model Development* 10.11. Publisher: Copernicus GmbH, p. 4257-4283. ISSN : 1991-959X. DOI : 10.5194/gmd-10-4257-2017. URL : https://gmd.copernicus.org/articles/10/4257/2017/.

VUUREN, D. P. van et al. (2011). "The representative concentration pathways: an overview". In : *Climatic Change* 109.1, p. 5. ISSN : 1573-1480. DOI : 10.1007/s10584-011-0148-z. URL : https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z.

XU, Z., Y. HAN, C.-Y. TAM, Z.-L. YANG et C. FU (2021). "Bias-corrected CMIP6 global dataset for dynamical downscaling of the historical and future climate (1979–2100)". In : *Scientific Data* 8.1, p. 293. ISSN : 2052-4463. DOI : 10.1038/s41597-021-01079-3. URL : https://www.nature.com/articles/s41597-021-01079-3.

Chapitre 5

Réflexions et perspectives

■ *Beacause I could not stop for death*
He kindly stop for me
The Carriage held but just Ourselves
And Immortality.

We slowly drove – He knew no haste
And I had put away
My labor and my leisure too,
For His Civility

We passed the School, where Children strove
At Recess – in the Ring –
We passed the Fields of Gazing Grain –
We passed the Setting Sun

Or rather – He passed Us –
The Dews drew quivering and Chill –
For only Gossamer, my Gown
My Tippet – only Tulle –

We paused before a House that seemed
A Swelling of the Ground –
The Roof was scarcely visible
The Cornice – in the Ground –

Since then – 'tis Centuries – and yet
Feels shorter than the Day
I first surmised the Horses' Heads
Were toward Eternity – ■

Poème d'Emily Dickinson (479)
Mis en musique par Susan Mckeown
Chant Susan McKeown & Natalie Merchant

Ce manuscrit présente les travaux de recherche débutés avec ma reconversion thématique opérée entre 2005 et 2007 vers le domaine de la climatologie. J'ai à dessein occulté mes années de thèse et de post-doctorat. Les recherches conduites durant cette période (1994–2001) s'inscrivaient dans le champ de la télédétection radar pour évaluer la ressource forestière. Ce domaine a un intérêt indirect pour la climatologie via notamment l'estimation du stock de carbone sur pied. L'évoquer aurait, me semble t-il, contribué à alourdir et bruiter le présent document.

Articuler données climatiques régionalisées et modèles d'impact est la voie sur laquelle je me suis engagé depuis maintenant plusieurs années. Mon cheminement sur cette voie s'est déroulé en essayant de concilier une recherche stimulante et exigeante avec une activité d'enseignement qui l'est tout autant. La tâche est loin d'être simple mais elle a été rendue possible avec le support précieux et inestimable du Centre de Recherches de Climatologie (CRC). En initiant des travaux sur la régionalisation dynamique du climat, le CRC a opéré une triple inflexion. Tout d'abord, en produisant des données climatiques qui sont dédiées. Simuler le climat régional est une chose, s'assurer que ces données ont une utilité en est une autre. J'ai investi cette dimension avec l'idée d'évaluer leur qualité et leur contenu informatif. Ce point rejoint une de mes préoccupations majeures et fait écho à mes travaux antérieurs. Ensuite, cela s'est accompagné d'un recentrage géographique sur le quart nord-est de la France et la région Bourgogne Franche-Comté. Même si je fais quelques excursions hors de cet espace, mes principales activités y sont concentrées. Enfin, les manifestations du changement climatique sur ces territoires ont conduit le CRC à investiguer les modalités et les impacts qui y sont associés. Mes questions scientifiques s'adressent et s'appuient prioritairement sur les composantes de ces espaces que sont les agro-, les sylvo et les hydro-systèmes.

Ces inflexions sont, en soit, le lot commun de la vie d'une équipe de recherche et d'un chercheur ou d'un enseignant-chercheur. Il importe néanmoins de maintenir des équilibres et éviter un éparpillement qui pourrait nous éloigner de notre coeur de métier. J'ai ce soucis. Les sollicitations nombreuses, tant pour contribuer à des projets de recherche ou répondre à des acteurs (inter-professions, collectivités etc.) soucieux de l'évolution du climat sur leur territoire, ont fait que je suis engagé dans beaucoup d'actions. Ces demandes tant scientifiques que sociétales sont très importantes et la recherche que nous conduisons ne peut s'en détourner. Mais il faut éviter l'écueil de n'être qu'au service d'autres domaines ou activités sans pouvoir faire avancer nos propres questionnements. C'est pour cela que j'essaie de cocontruire une articulation à bénéfice réciproque avec mes collègues (agronomes, forestiers, hydro-géochismistes, géographes-sociologues). Mais ce volet ne peut fonctionner qu'en ayant des données climatiques régionales crédibles qui nous permettent d'avancer. Cet aspect est au centre dans ma recherche.

La régionalisation climatique dynamique comme statistique progresse et je suis loin dans le cadre de ce mémoire d'en avoir présenté toutes les facettes. Les modèles régionaux sont je pense pertinents pour poursuivre les actions engagées. Je m'attache en priorité à mettre en oeuvre le nouveau protocole de descente d'échelle avec les nouvelles données (réanalysées et projetées) de forçages. Les simulations qui seront produites comme les précédentes et celles mise à disposition par la communauté des climatologues permettront de confirmer/d'infirmer/préciser les résultats déjà acquis. De plus, les trajectoires régionalisées de l'évolution du climat seront à la fois utiles pour analyser directement et indirectement les modifications de la variabilité et permettre de tester divers scénarios d'adaptation.

Ce dernier aspect est très important. Dans l'urgence et l'impréparation, la mésadaptation des territoires face au changement climatique guette. Or, nous avons besoin d'opérer et de déployer des transitions et des adaptations agricoles ou forestières sans regret. Nous pouvons et devons contribuer à cela. Je vais donc poursuivre les actions déjà engagées sur la perception du réchauffement climatique et les conséquences sur les acteurs des territoire.

Suite au projet ELVITA nous avons déposé le projet TRAVERSER (appel d'offre MSA) en élargissent le partenariat. Le pré-projet vient d'être sélectionné. Je suis également associé au projet présélectionné ANR CLEFTS avec des collègues de l'université de Franche-Comté qui porte sur les transitions socio-écologiques. Je vais enfin poursuivre mes collaborations débutées avec l'ANR CoSAC. Dans cette dernière des résultats préliminaires intéressants on été obtenus sur la résilience de systèmes de culture conventionnels et agroécologiques face au changement climatique (cf. image de couverture du mémoire où figurent les sites utilisés). En lien, Quentin Cournault (élève-ingénieur fonctionnaire) a candidaté pour une thèse FCPR [1] entre l'équipe CRC et l'équipe de Nathalie Colbach et Delphine Moreau (équipe Système UMR Agroécologie, Dijon). Si le projet de thèse venait à être accepté et dans la perspective d'obtenir mon HDR, je prendrais la direction de la thèse avec Nathalie Colbach.

Le climat a changé, les mesures nous le disent, les modèles arrivent à le reproduire, et cela affecte diverses composantes de la biosphère et de l'hydrosphère. Le massif du Morvan par ses particularités physiographiques (e.g. socle granitique, régime pluvial) apparaît comme une "île climatique" et une zone de transition qui en font une caisse de résonance du changement climatique. Je suis impliqué dans deux projets (PEI [2] du Mont Beuvray et ANR COUDRIER) centrés sur le Morvan et qui viennent d'être acceptés. Je vais dans ce cadre poursuivre l'articulation entre régionalisation climatique et modélisation du bilan hydrique sous couvert forestier en explorant également les liens avec les flux de carbone du sol et de l'écosystème. Ce dernier aspects sera porté par Julien Crétat (recruté fin 2022 dans l'UMR Biogéosciences sur une Chaire Professeur Junior). Ses travaux seront conduits à cheval entre les équipes CRC et SEDS de l'UMR Biogéosciences.

Enfin, je n'ai à ce jour pas pu valoriser tous les résultats que nous avons obtenu sur l'évolution du risque gélif hivernal. Qu'est ce que nos résultats nous disent sur les modalités et les modifications fines du régime des températures de surface sur la région Bourgogne Franche-Comté et au delà ? Cette question est symbolisée par les flèches de retour du schéma conceptuel de la figure 1.1. Elle revient à se demander comment on peut "désintriquer" aléas et vulnérabilités. C'est une question que l'on se pose également dans la thèse Cifre de Léa Laurent. Est-ce que des approches statistiques de type détection-attribution ou modèle de Markov non-homogène sont susceptibles de répondre à nos besoins ? Cela rejoint l'idée de filtrage des modifications de la variabilité climatique que j'ai esquissé.

Un profil d'enseignant-chercheur de l'Institut Agro Dijon en mathématique appliquée et statistiques a été proposé pour effectuer sa recherche au sein du CRC. J'ai été impliqué dans la rédaction du profil qui sera défendu par Thomas Saucède (directeur de l'UMR Biogéosciences) au prochain comité de la recherche de l'institut. Le recrutement d'un(e) collègue porteur de ces compétences pourrait nous permettre d'avancer beaucoup plus vite sur ces questions.

Ces perspectives déboucheront je l'espère sur des résultats majeurs, utiles et importants. Ne l'ayant jusque là que très peu évoqué, mes enseignements et les formations dans lesquelles je suis impliqué bénéficieront évidemment de ces activités. En effet, je tiens depuis mon recrutement en tant que Maître de Conférences à relier fortement recherche et enseignement dès que cela est possible.

1. Formation Complémentaire Par la Recherche – Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire

2. Partenariat Européen d'Innovation

Annexe A

Curriculum Vitae

A.1 État civil

Nom patronyme et prénoms : CASTEL, Thierry Marc
Date et lieu de naissance : né le 21 Mai 1968 à Carcassonne, Aude, France
Situation familiale : marié, 2 enfants nées en 2003, **Nationalité** : Française
Maître de Conférences Hors Classe, CNECA 2
L'Institut Agro Dijon 26, rue du Dr. Petitjean – BP 87999 – 21079 Dijon Cedex
Tél : 03.80.77.28.69 / Fax : 03.80.77.25.51 / Courriel : thierry.castel@agrosupdijon.fr ou tcastel@u-bourgogne.fr

A.2 Diplômes

Tableau A.1 – Titres et diplômes

1994-1998	**Thèse de Doctorat** de l'Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, spécialité Sciences Forestières. *Mention très honorable avec les félicitations du jury.* Titre : *Estimation de la ressource forestière par télédétection radar à synthèse d'ouverture (RSO).* Directeur de thèse : Claude Millier (ENGREF) co-directeur : André Beaudoin (ENGREF) Rapporteurs : François Houllier (INRA/CIRAD), Shaun Quegan (Univ. de Sheffield) Examinatrice/eurs : Thuy le Toan (CNRS), Pierre Ballaire (Ademe), Frédéric Berger (Cemagref) Invités : Maurice Borgeaud (ESA), Philippe Durand (ONF)
1991-1992	**DEA Télédétection de la biosphère continentale** – Université Paul Sabatier – Toulouse III – Mention Bien

A.3 Langues étrangères

-**Anglais** : lu, parlé et écrit scientifique ;
-**Espagnol** : lu, parlé et notions d'écrit

A.4 Distinctions

-Lauréat du meso-challenge 2018 - *Journées Calcul & Données, ENS Lyon, 24-26 octobre*.
-Prix Headway in Spatial Data Handling, Springer, 2008 *13th International Symposium on Spatial Data Handling*.

A.5 Cursus professionnel

depuis 2023	- Membre de jury pour les concours interne et externe d'ingénieur d'études pour la BAP D – Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire
depuis 2020	- Membre du conseil scientifique du Parc Naturel Régional du Morvan - Membre du comité de portage de la Zone Atelier MOrvan (ZAMO). Co-animateur de l'axe *'changements climatiques et enjeux environnementaux'*
depuis 2017	- Co-responsable du Master 2 **SEME** (**S**ol **E**au **M**ilieu **E**nvironnement) - Responsable du double diplôme entre la dominante **R2D2C**[1] et le Master **SEME**
2016-2022	**Enseignant** Institut Agro Dijon et **Chercheur associé** UMR Biogéosciences 6282 équipe CRC CNRS/uBFC/EPHE, Dijon - Animateur de l'axe de recherche Climat–Sociétés - Elu au conseil des enseignants d'AgroSup Dijon jusqu'à fin 2019
2012-2015	**Enseignant** AgroSup Dijon et **Chercheur associé** UMR Biogéosciences 6282 équipe CRC CNRS/Université de Bourgogne, Dijon - Responsable du pôle de simulation climatique pour l'UMR - Création de modules d'Analyse et de statistiques spatiales appliquées
2007-2011	**Enseignant** AgroSup Dijon et **Chercheur associé** au Centre de Recherches de Climatologie CRC UMR 5210 CNRS/Université de Bourgogne, Dijon - Création de cours en Agroclimatologie en contexte de changement climatique
2005-2007	**Chercheur en délégation** section 19[2] du CNRS au Centre de Recherches de Climatologie (CRC) UMR 5210 CNRS/Université de Bourgogne, Dijon - Reconversion thématique : de la Télédétection radar à la Climatologie
2005	**Enseignant** ENESAD et **Chercheur associé** au Centre de Recherches de Climatologie CRC UMR 5210 CNRS/Université de Bourgogne, Dijon - Labellisation de mon Association Scientifique Individuelle
2003	**Maître de Conférences titulaire** Département Agronomie et Environnement – ENESAD, Dijon - Elu au conseil scientifique de l'ENESAD jusqu'en 2007
2001-2003	**Maître de Conférences stagiaire** Département des Sciences et Techniques Agronomiques – ENESAD, Dijon - Création des modules Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour l'ensemble des formation de l'école
2000-2001	**Chercheur post-doctorant**, UMR 5126 CNRS/CNES/IRD/Université Toulouse III – Centre d'Etudes Spatiale de la BIOsphère – Toulouse
1998-2000	**Chercheur post-doctorant**, Fundación Instituto de Ingeniería – Caracas Venezuela & Laboratoire AMAP/CIRAD-AMIS – UMR BBAP 931 CIRAD/INRA/CNRS/Université Montpellier II – Montpellier
1994-1998	**Doctorant**, Laboratoire Commun de Télédétection UMR ENGREF/Cemagref – Montpellier
1993-1994	**Ingénieur d'étude**, Laboratoire Commun de Télédétection UMR ENGREF/Cemagref – Montpellier
1992-1993	**Service militaire national**, Corps de santé des armées – CHA H. Larrey – Toulouse

1. **R**essources **D**onnées **D**iagnostics **C**hangements **C**limatiques
2. Système Terre : enveloppes superficielles

A.6 Formation complémentaires suivies

Tableau A.2 – Formations suivies

2022	Sensibilisation aux gestes qui sauvent : GQS – 1/2 journée
2019	Formation à la statistique Bayesienne – 3 jours
2018	Formation à Python – 2 jours
2008	Formation sur la grille de calcul Européen EGEE à Annecy le Vieux – 3 jours
2007	Programmation en Fortran 90. Introduction à la programmation paralèlle MPI/OpenMPI – Centre de Calcul de l'Université de Bourgogne – 3 jours
2001-2002	Formation pédagogique pour les nouveaux Maîtres de Conférences du ministère de l'agriculture. Présentation en décembre 2002 d'un projet pédagogique ayant les SIG pour thème – 10 jours
1995	Utilisation des données radar pour l'étude de l'environnement. ENGREF – Centre de Montpellier – 5 jours
1994	Formation au Système d'Information Géographique Arc-Info. ENGREF – Centre de Montpellier – 5 jours

Annexe B

Encadrements de la recherche

B.1 Thèses de doctorat

Tableau B.1 – Thèses co-dirigées ou co-encadrées

Nom et Prénom	Sujet de Thèse	Période	Devenir
Thèses en co-direction/co-encadrement			
Marie-Laure Houzé	*Prévision et spatialisation des concentrations en ozone troposphérique en Bourgogne* co-direction avec Pr. Yves Richard	2003–2006	Cadre dans une structure de développement durable
Cuccia Cédric	*Impacts du changement climatique (1950–2050) sur les potentialités du pinot noir et du chardonnay en Bourgogne* co-direction avec Pr. Yves Richard	2009–2013	Professeur des écoles
Damien Boulard	*Vulnérabilité des forêts du Centre-Est de la France face au changement climatique* co-direction avec Pr. Pierre Camberlin	2013–2016	Office Manager Cartography & GIS
Bilel Fathalli	*Simulations des impacts d'un lac artificiel sur le climat d'une région aride : Exemple de Chott El Jérid –Sud de la Tunisie* co-encadré avec Dr. Benjamin Pohl	2012-2016	Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis – Tunisie
Blanchet Valentin[1]	*La résilience des écosystèmes forestiers tempérés face au changement climatique : évolution des ressources hydriques et fonctionnement biogéochimiques des sols pour des forêts de plaine et de montagne de Bourgogne Franche-Comté* co-direction avec Dr. Philippe Amiotte-Suchet	débuté le 01/11/2020	Thèse en cours Bourse région BFC projet PubPrivLands
Laurent Léa[2]	*Evolution des risques agro-climatiques en lien avec les modifications de l'aléa climatique (longs épisodes secs et bilan hydrique) en contexte de réchauffement* co-direction avec Dr. Albin Ullmann	débuté le 01/12/2020	Thèse en cours Bourse Cifre Groupama
Thèses suivies			
Pascal Oettli	*Précipitations et relief en Afrique orientale et australe : modélisations statistiques et géostatistiques*	2005–2008	Research associate – JAMSTEC
Etienne Brulebois	*Impact du changement climatique sur la disponibilité de la ressource en eau en Bourgogne : aspects qualitatif et quantitatif*	2013-2016	Ingénieur d'étude environnement, Géotec – Dijon
Basile Pautier	*Étude de la variabilité spatio-temporelle des précipitations aux échelles fines : Conséquences potentielles pour la viticulture en Bourgogne*	2013-2017	Chef de projet agro-météo CIVC
Sébastien Zito	*Évolution du risque phytosanitaire au vignoble dans le nord-est de la France en lien avec le changement climatique : observations et modélisation*	2017-2021	Post-doctorat
Catinca Gavrilescu	*Analyse spatiale et temporelle des extrêmes climatiques en Bourgogne-Franche-Comté : impacts sur la viticulture*	depuis 2018	en cours

1. je co-dirige cette thèse avec Philippe Amiotte-Suchet. Mon dossier de demande de co-direction auprès du CS de l'université de Bourgogne est déposé simultanément à mon dossier d'inscription à l'HDR

2. je co-dirige cette thèse avec Albin Ullmann. Mon dossier de demande de co-direction auprès du CS de

B.2 Post-doctorats, ingénieurs

TABLEAU B.2 – Encadrement de post-doctorant(e)s et ingénieurs

Nom et Prénom	Thème des travaux	Période	Devenir
Dr. Yiwen Xu	*Régionalisation et projection des changements climatiques en Bourgogne dans le cadre du scénario SRES-A2* – post-doc financé par la région Bourgogne et le CNRS	2008–2010	Post-doctorante Bergen (Norvège) LISA (France)
Dr. Romain Marteau	*Evaluation de la régionalisation des pluies en Bourgogne à partir du modèle régional ARW/WRF* – contrat CDD de 3 mois financé par l'Ademe	2011	Chargé d'études Modélisation risque climat GENERALI – Paris
Dr. Aurélien Rossi	*Impact du changement climatique sur l'évolution de la ressource en eau en Bourgogne* – post-doc financé par le projet GICC HYCCARE–Bourgogne	2013–2015	Ingénieur d'étude EAU BURGEAP – Rouen
Dr. Etienne Brulebois	*Régionalisation de l'évolution du risque gélif du pois d'hiver en contexte de réchauffement climatique* – 6 mois de CDD financés par les projets PSDR4 Prosys & ANR CoSAC	2017	Ingénieur à Geotec – Dijon
Marie Prudhon ingénieur d'études	*Évolution de la structure du risque gélif futur en Bourgogne Franche-Comté à une résolution de 200 mètres* – 3 mois de CDD financés par le projet PSDR4 Prosys	2020	ECOVIGNE BEAUJOLAIS MACONNAIS

l'université de Bourgogne est déposé simultanément à mon dossier d'inscription à l'HDR

B.3 Masters

Tableau B.3 – Mémoires encadrés ou co-encadrés du niveau Master 2

DEA/Masters 2 recherche			
Nom et Prénom	**Sujet du mémoire**	**Date**	**devenir**
Clémence Hamot	*Étude de l'évolution des longs et très longs épisodes secs en France métropolitaine depuis les années 1960*	2022-2023	Poursuite en thèse envisagée
Maël Aubry	*Ajustement d'un modèle de bilan hydrique pour quelques cépages de vigne. Évaluation et analyse en contexte de réchauffement climatique abrupt*	2021-2022	CDD INRAE – poursuite en thèse prévue
Mamadou Traoré	*Analyse comparative des précipitations et d'épisodes de sécheresse. Effet de l'installation de générateurs anti-grêle ?*	2020-2021	en recherche d'une bourse de thèse
Bertrand Ratel	*Régionalisation du risque gélif du pois d'hiver en Bourgogne Franche-Comté par modélisation numérique : validation du modèle WRF*	2015-2016	Ingénieur d'étude et développement Business Intelligence Junior chez Business & Decision
Klein Geoffrey	*Variabilité interannuelle (1989-2009) simulée (ARW/WRF) et observée (Météo-France) des précipitations en Bourgogne*	2010-2011	Doctorat université de Neuchâtel, en cours
Ekicier Nicolas	*Utilisation des données satellite radar pour le suivi spatio-temporel des pluies au Kenya à travers les états de surface*	2010-2011	Société Geosys
Doll David	*Apport et analyse des images satellites MODIS pour le suivi des douglassaies en Bourgogne*	2009-2010	NC
Cuccia Cédric	*Changements Climatiques observés en Bourgogne depuis 1961 : Etude des variations de températures et de précipitations*	2007-2008	Thèse soutenue en 2013. Professeur des écoles
Bonnefoy Cyril	*Apport du modèle climatique méso-échelle WRF à l'étude des relations climat-vigne en Bourgogne*	2007-2008	Thèse soutenue en 2013 à l'Univ de Rennes 2. Directeur de TerraClima
Legat judicael	*Apport du modèle météorologique méso-échelle (WRF) dans l'estimation des conditions climatiques aux échelles régionale et infra-régionale en Bourgogne*	2006-2007	Ingénieur informaticien SOPRA
Jean-Noel Dodane	*Impact du sol et du climat sur une parcelle viticole*	2004-2005	Conseiller Agronomique Préconisateur, SA Peris
Jean-Michel Martinez	*Analyse de données interférométrique au dessus de couverts forestiers*	1996-1997	Chercheur IRD

Annexe C

Projets de recherche

Tableau C.1 – Projets, programmes de recherches et responsabilités

Projets et programmes	Responsibilities	Partenaires	Période
EUFORA Grant agreement ID : ENV4960303 : European forest observations by radars	Forest radar, Ph.D Thesis	European Commission	1996-1998
CVG-PROFORCA : EVALUACIÓN DE LAS PLANTACIONES (Pinus Caribae)	Post-doc grant	INSTITUTO DE INGENIERÍA	1999-2000
Contrat Sucrerie Souppes : Analyse de la qualité des jus de betterave	Analyse spatiale des données	Sucrerie Ouvré et fils	2003-2004
GICC/HYCCARE-Bourgogne : Changement climatique, ressource en eau www.gip-ecofor.org/gicc/ ?q=node/534	WP1 Modélisation hydroclimatique	multi-partenariat régional, national	2012-2016
ANR CoSAC ANR-14-CE18-0007 : Changement climatique, gestion des Adventices	WP3 : données climatiques projetés	multi partenariat national	2015-2019
Prosys/PSDR-4 : Changement climatique, systèmes de culture, protéines végétale Soumis	Axe 1 : Projection climatique	multi-partenariat régional	2016-2020
DiCy-CA/Projet LEFE CNRS : Diurnal Cycles in Central Africa	Action 3 : Simulation régionale du climat d'Afrique Centrale	multi partenariat national	2017-2019
ValéaClim/Projet structurant d'envergure Région BFC : Impact des extrêmes thermiques sur l'écosystème viticole en Bourgogne-Franche-Comté	Régionalisation des projections climatiques	Biogéosciences, BIVB[1]	2018-2021
PubPrivLands/Projet intégré ISITE-BFC : Public vs Private Lands interactions	WP4 : Modélisation bilan hydrique et hydrologique	Multi partenariat international	2018-2022
DYVALOCCA/ANR international : Dynamics, variability and bioclimatic effects of low clouds in western Central Africa	WP5 : bioclimatic effects	Multi partenariat national, international	2020-2023
ELVITA : Elevage, Viticulture et adaptation au(x) Changement(s) climatique(s) en Saône-et-Loire	Analyse comparative précipitation, épisodes secs	ARELFA, INRAE, Univ. Bourgogne	2020-2021
ANRT Cifre : Evolution des risques agroclimatiques	co-responsabilité scientifique avec Dr. A. Ullmann	Groupama/ CRC	2020-2023
ANR COUDRIER : CO-construction d'Usages Durables des Ressources et des Infrastructures d'une Eau devenant Rare	WP5. Projections hydroclimatiques	Multi partenariat national	Acceptée 2023-2026
MSA TRAVERSER : TRAVail en élevage, Épreuves et Ressources face à la SÉcheresse en Région Bourgogne-Franche Comté	WP1. Characteriser les sécheresses et leur vécu par les éleveurs	Multi partenariat national	Soumis janvier 2023
Partenariat Européen d'Innovation : Un laboratoire d'expérimentation forestière sur le site classé du mont Beuvray	Action 1. Mettre sur pied un laboratoire expérimental	Multi partenariat national	accepté 2024-2026
ANR CLEFTS : Transitions Socio-écologiques	Multi-partenariat national	Multi partenariat national	Soumis mars 2023

1. Bureau Interprofessionnel des Vins de Bourgogne

Annexe D

Prestations de services et expertises

— Expert BAP D pour le ministère de l'Agriculture de 2004 à 2012 & depuis 2023. Participation à un jury IDPE[1] spécialité agriculture, à un jury de recrutement externe d'un ingénieur d'étude et à deux jurys nationaux de promotion interned'ingénieur de recherche ;

— Expertise scientifique de deux projets de recherche pour la Fondation canadienne de l'innovation 'Fonds de leaders John-R Evans', 2019 ;

— Expertise scientifique pour l'appel d'offre générique 2019 de l'ANR (département DOS/COSSE), projets internationaux ;

— Membre du comité de suivi des thèses de :
Clara La Cap (Univ. Bretagne Loire 2019-2022)
Catinca Garilescu (Univ. Bourgogne 2018-2021)
Sébaste Dito (Univ. Bourgogne 2017-2020)
Etienne Brulebois (Univ. Bourgogne 2017-2020)
Basile Pauthier (Univ. Bourgogne 2013-2017) ;

— Assistance à maîtrise d'ouvrage en vue d'étudier la faisabilité d'un dispositif d'aide à l'investissement pour des équipements de protection contre les dégâts de gel en agriculture en Bourgogne-Franche-Comté. Marché passé selon la procédure adaptée en application des articles 42 2 de l'ordonnance 2015-899 du 23/07/2015 et 27 du décret 2016-360 du 25/03/2016 relatif aux marchés publics.
Rapport déposé en octobre 2018, 216p. Restitution finale le 16/01/2019 devant les élues du conseil régional et les inter-professions : vigne, cassis, grandes cultures.

— En 2013 (9/12-10/12) formation pour 2 chargés de mission de la chambre d'agriculture de Saône et Loire (Mme Sophie Simonet et M. Julien Halska) sur l'analyse spatiale appliquée au bassin versant de Pont-du-Roy (71) à partir du logiciel SIG QGIS ;

— Expertise climatique d'échelle locale projet FEADER BIJOU : "La truffe de Bourgogne, un produit de qualIté à forte valeur aJOUtée, 2015 ;

— Expertise pour la constitution d'une base de données sur les évènements climatiques extrêmes pour l'association InFoclimat, 2011 ;

— Pour le GIS-Agrale : pilotage de l'action "Analyse d'Image et Modélisation". 2008 ;

Jury de sélection et de validation

— Président du jury de sélection du Double diplôme ;

— Membre du jury de validation du Master 2 SEME ;

1. Ingénieur Diplômé Par l'État

Concours de recrutement et de promotion

Tableau D.1 – Concours de recrutement ingénieurs

Type	**Desciption**	**Périodes**
Ingénieurs de Recherche	Concours interne d'accès au corps (52 candidatures)	Etude des dossiers 17 au 21 septembre 2007 Epreuve orale 22 au 26 octobre 2007
Ingénieurs de Recherche	Concours interne d'accès au corps (98 candidatures)	Etude des dossiers 13 au 13 septembre 2011 Epreuve orale 21 au 25 octobre 2011
Ingénieurs d'étude	Concours externe d'accès au corps (10 candidatures)	Etude des dossiers 28 octobre 2008 Epreuve orale 17 novembre 2008
Ingénieur IDPE	Spécialité agriculture M. G. Arnold	1re session 19 janvier 2016, 2e session 12 octobre 2017
Ingénieurs d'étude	Recrutement IE Géomatique Institut Agro Dijon	Epreuve orale 6 & 7 septembre 2022

Jury de soutenance

- $\sim$ 6 présidences/an de jury de mémoire de fin d'études d'ingénieur ;
- $\sim$ 8 présidences/an de jury de mémoire de master 2 SEME ;
- $\sim$ 20 jurys de soutenance de mémoire de fin d'études ingénieurs, masters et stage ingénieur niveau Master 1 à l'étranger ;
- 6 jurys de soutenance de thèse ;

Reviewer ($\sim$2 reviews/an) pour des revues nationales et internationales à comité de lecture : Int. Journal of Climatology, Climate Dynamics, Journal of Geophysical Research, Env. Modelling & Software, La Météorologie.

Annexe E

Liste des travaux

E Liste des travaux

E.1 Publications Scientifiques dans des revues à comité de lecture

Bois, Benjamin, Catinca Gavrilescu, Sébastien Zito, Yves Richard et Thierry Castel (2023). « L'incertaine évolution des risques de gelées de printemps au vignoble au 21e siècle ». In : *International Viticulture and Ecology Society – technical review vine & wine*, under revision.

Castel, T., N. Cavan, J. Pergaud, F. Angevin et N. Colbach (2023). « Resilience to climate change of innovative weed management strategies ». In : *Global Change Biology*, in prep.

Fathalli, Bilel, Benjamin Pohl, Pere Quintana Seguí, Yves Tramblay, Albin Ullmann et Thierry Castel (2023). « Weather regimes and rainfall over Tunisia in a multi-model ensemble versus a multi-member ensemble ». In : *Climate Dynamics*. DOI : https://doi.org/10.1007/s00382-022-06656-9.

Laurent, Léa, Ullmann Albin et Thierry Castel (2023a). « How abrupt changes in surface temperature impacts water cycle over France ? The case study of winter bread wheat area ». In : *Total Environment Research Themes*, Submitted.

Petit, Sandrine, Thierry Castel, Gabrielle Henrion, Yves Richard, Mamadou Traoré, Marie-Hélène Vergote et Juilette Young (2023). « Changing local climate patterns through geo-engineering ? Learning from a conflict around hail suppression systems and droughts in the Burgundy wine region of France ». In : *Regional Environmental Change*, under revision, Submission EMID :7ec8b443c3a6c0e8.

Zito, S., J. Pergaud, Y. Richard, T. Castel, R. Leroux, I. Garcia De Cortazar, H. Quenol et B. Bois (2023). « Projected impacts of climate change on viticulture over French wine-regions using downscalled CMIP6 multi-model data ». In : *Oeno One*, In revison.

Ubertosi, Marjorie, Thierry Castel, D DE Fornel, Maé Guinet, Daniel Joly, Annabelle Larmure, Eric Lucot, Bernard Nicolardot, M.S Petit, Wilfried QUEYREL, Corinne Tanguy, Marie-Hélène Vergote, Anne-Sophie A.-S. Voisin et Christophe Lecomte (mars 2022a). « PSDR4 ProSys - L'adaptation pédoclimatique, les impacts environnementaux et la valeur économique de nouveaux systèmes de culture durables producteurs de protéines en Bourgogne-Franche-Comté ». In : *Innovations Agronomiques* 86, p. 173-189. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-03686545.

Ubertosi, Marjorie et al. (mars 2022b). « Adaptation des systèmes de production agricole aux changements de contexte environnemental, agricole et social, et place des légumineuses dans la transitionagroécologique ». In : *Innovations Agronomiques* 86. Ce numéro regroupe des textes issus des projets ayant travaillé dans le cadre du Programme PSDR 4, sous l'égide d'INRAE et de 10 Régions françaises., p. 419-437. DOI : 10.17180/ciag-2022-vol86-art34. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-03687097.

Bois, Benjamin, Basile Pauthier, Luca Brillante, Cornelis Van Leeuwen, Olivier Mathieu, Jean Leveque, Thierry Castel et Yves Richard (2020). « Sensitivity of grapevine soil–water balance to rainfall spatial variability at local scale level ». In : *Front. Environ. Sci* 8, p. 1-14. DOI : 10.3389/fenvs.2020.00110. URL : https://hal.inrae.fr/hal-02935121.

Cavan, Nicolas, Thierry Castel, Julien Pergaud, Frédérique Angevin et Nathalie N. Colbach (déc. 2020). « Et demain ? Robustesse des stratégies innovantes de gestion des adventices face au changement climatique ». In : *Innovations Agronomiques* 81, p. 209-225. DOI : 10.15454/fqye-3778. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-03105517.

Fathalli, Bilel, Thierry Castel et Benjamin Pohl (2020a). « Correction to : Simulated effects of land immersion on regional arid climate : a case study of the pre-Saharan playa of Chott el-Jerid (South of Tunisia) ». In : *Theoretical and Applied Climatology* 140.1, p. 251-251. ISSN : 1434-4483. DOI : 10.1007/s00704-020-03121-7. URL : https://doi.org/10.1007/s00704-020-03121-7.

— (avr. 2020b). « Simulated effects of land immersion on regional arid climate : a case study of the pre-Saharan playa of Chott el-Jerid (south of Tunisia) ». In : *Theoretical and Applied Climatology* 140, p. 231-250. DOI : 10.1007/s00704-019-03083-5. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02433825.

Petit, Sandrine, Marie-Hélène Vergote, Thierry Castel et Yves Richard (août 2020). « Le climat " par procuration ". De l'usage des proxys pour relier les savoirs ». In : *Natures Sciences Sociétés* 28.1, p. 12-23. DOI : 10.1051/nss/2020016. URL : https://hal.inrae.fr/hal-02920443.

Zito, Sébastien, Thierry Castel, Yves Richard, Mario Rega et Benjamin Bois (sept. 2020). « Optimization of a leaf wetness duration model ». In : *Agricultural and Forest Meteorology* 291, p. 108087. DOI : 10.1016/j.agrformet.2020.108087. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02887671.

Castel, Thierry, Christophe Lecomte, Yves Richard, Isabelle I. Lejeune-Henaut et Annabelle Larmure (2019). « Évolution retrospective du risque gélif hivernal en climat tempéré suite au réchauffement climatique ». In : *Bourgogne-Franche-Comté Nature* 29. 15ème Rencontres Bourgogne-Franche-Comté Nature - Changement climatique, humanité et biodiversité, p. 325-334. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02185069.

Fathalli, Bilel, Benjamin Pohl, Thierry Castel et Mohamed Jomaa Safi (jan. 2019). « Errors and uncertainties in regional climate simulations of rainfall variability over Tunisia : a multi-model and multi-member approach ». In : *Climate Dynamics* 52.1-2, p. 335-361. doi : 10.1007/s00382-018-4150-2. url : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-01789898.

Pauthier, Basile, Benjamin Bois, Thierry Castel, D. Thevenin, Carmela Chateau Smith et Yves Richard (mars 2019). « Corrigendum #2 to "Mesoscale and Local Scale Evaluations of Quantitative Precipitation Estimates by Weather Radar Products during a Heavy Rainfall Event" ». In : *Advances in Meteorology* 2019, p. 1-1. doi : 10.1155/2019/7128490. url : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02297354.

Richard, Yves, Sandrine Petit, Marie-Hélène Vergote et Thierry Castel (2019). « Le changement climatique : où en sommes-nous ? » In : *Bourgogne-Franche-Comté Nature* 29, p. 143-149. url : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02315848.

Zito, Sébastien, Yves Richard, Thierry Castel et Benjamin Bois (2019). « Impact du changement climatique sur l'oidium de la vigne : cas de la Champagne ». In : *Bourgogne-Franche-Comté Nature* 29. 15ème Rencontres Bourgogne-Franche-Comté Nature - Changement climatique, humanité et biodiversité, p. 206-212. url : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02185105.

Brulebois, Etienne, Marjorie Ubertosi, Thierry Castel, Yves Richard, Sabine Sauvage, Jose-Miguel Sanchez-Perez, Nicolas Le Moine et Philippe Amiotte-Suchet (2018). « Robustness and performance of semi-distributed (SWAT) and global (GR4J) hydrological models throughout an observed climatic shift over contrasted French watersheds ». In : *Open Water Journal* 5.1, p. 41-56. url : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02368907.

Joly, Daniel, Thierry Castel, Benjamin Pohl et Yves Richard (2018). « Influence of spatial information resolution on the relation between elevation and temperature ». In : *International Journal of Climatology* 38.15, p. 5677-5688. doi : 10.1002/joc.5771. url : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01863415.

Richard, Yves, Justin Emery, Julita Dudek, Julien Pergaud, Carmela Chateau-Smith, Sébastien Zito, Mario Rega, Thibaut Vairet, Thierry Castel, Thomas Thévenin et Benjamin Pohl (2018a). « How relevant are local climate zones and urban climate zones for urban climate research ? Dijon (France) as a case study. » In : *Urban Climate* 26. 17 pages, p. 258-274. doi : 10.1016/j.uclim.2018.10.002. url : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01918945.

Zito, Sébastien, Amelia Caffarra, Yves Richard, Thierry Castel et Benjamin Bois (août 2018a). « Climate change and vine protection : the case of mildews management in Burgundy ». In : *E3S Web of Conferences* 50, p. 01006. doi : 10.1051/e3sconf/20185001006. url : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02158511.

Boulard, Damien, Thierry Castel, Pierre Camberlin, Anne-Sophie Sergent, Daphné Asse, Nathalie Bréda, Vincent Badeau, Aurélien Rossi et Benjamin Pohl (jan. 2017). « Bias correction of dynamically downscaled precipitation to compute soil water deficit for explaining year-to-year variation of tree growth over northeastern France. » In : *Agricultural and Forest Meteorology* 232. 18 pages, p. 247-264. doi : 10.1016/j.agrformet.2016.08.021. url : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01360339.

Castel, Thierry, Christophe Lecomte, Yves Richard, Isabelle Lejeune-Hénaut et Annabelle Larmure (2017b). « Frost stress evolution and winter pea ideotype in the context of climate warming at a regional scale. » In : *OCL Oilseeds and fats crops and lipids* 24.1. 11 pages, p. D106. doi : 10.1051/ocl/2017002. url : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01562206.

Boulard, Damien, Thierry Castel, Pierre Camberlin, Anne-Sophie Sergent, Nathalie Bréda, Vincent Badeau, Aurélien Rossi et Benjamin Pohl (mai 2016). « Capability of a regional climate model to simulate climate variables requested for water balance computation : a case study over northeastern France. » In : *Climate Dynamics* 46.9-10. 28 pages, p. 2689-2716. doi : 10.1007/s00382-015-2724-9. url : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01309572.

Fathalli, Bilel, Benjamin Pohl, Thierry Castel et Mohamed Jomaa Safi (mai 2016). « Dynamical downscaling of temperature variability over Tunisia : evaluation a 21-year-long simulation performed with the WRF model. » In : *Journal of Climatology & Weather Forecasting* 4.2. 8 pages, p. 1000166. doi : 10.4172/2332-2594.1000166. url : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01333550.

Pauthier, Basile, Benjamin Bois, Thierry Castel, D. Thévenin, Carmela Chateau Smith et Yves Richard (2016). « Mesoscale and local scale evaluations of quantitative precipitation estimates by weather radar products during a heavy rainfall event. » In : *Advances in Meteorology* 2016. 9 pages, p. 6089319. doi : 10.1155/2016/6089319. url : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01385646.

Brulebois, Etienne, Thierry Castel, Yves Richard, Carmela Chateau-Smith et Philippe Amiotte-Suchet (déc. 2015a). « Hydrological response to an abrupt shift in surface air temperature over France in 1987/88. » In : *Journal of Hydrology* 531.3. 10 pages, p. 892-901. doi : 10.1016/j.jhydrol.2015.10.026. url : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01242283.

Marteau, Romain, Yves Richard, Benjamin Pohl, Carmela Chateau Smith et Thierry Castel (fév. 2015). « High-resolution rainfall variability simulated by the WRF RCM : application to eastern France. » In : *Climate Dynamics* 44.3-4. 15 pages, p. 1093-1107. doi : 10.1007/s00382-014-2125-5. url : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01112751.

Cuccia, Cédric, Benjamin Bois, Yves Richard, Amber Kaye Parker, Iñaki Garcia De Cortazar-Atauri, Cornelis Van Leeuwen et Thierry Castel (2014). « Phenological model performance to warmer conditions : application to Pinot noir in Burgundy. » In : *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 48.3. 10 pages, p. 169-178. doi : 10.20870/oeno-one.2014.48.3.1572. url : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01080580.

Pauthier, Basile, Benjamin Bois, Thierry Castel et Yves Richard (2014). « Note technique d'implantation d'un réseau de pluviomètres en terrain viticole sur la côte de Beaune (France). » In : *Climatologie* 11. 13 pages, p. 34-46. doi : 10.4267/climatologie.570. url : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01217568.

Richard, Yves, Thierry Castel, Benjamin Bois, Cédric Cuccia, Romain Marteau, Aurélien Rossi, Denis Thevenin et Hélène Toussaint (2014). « Évolution des températures observées en Bourgogne (1961-2011) ». In : *Bourgogne Nature* 19, p. 110-117. url : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02153152.

Molinier, Virginie, Marie-Lara Bouffaud, Thierry Castel, Arnaud Mounier, Annie Colombet, Ghislaine Recorbet, Henri Frochot et Daniel Wipf (déc. 2013). « Monitoring the fate of a 30-year-old truffle orchard in Burgundy : from Tuber melanosporum to Tuber aestivum. » In : *Agroforestry Systems* 87.6. 11 pages, p. 1439-1449. doi : 10.1007/s10457-013-9649-2. url : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00915215.

Petit, M.S., C. Challan-Belval, N. Blosseville, Stéphane Blancard, Thierry Castel, Christophe Lecomte et Gérard Duc (2012). « Un exemple de gestion de systèmes de polyculture élevage à l'échelle de territoires : le cas des protéagineux et de l'élevage de monogastriques en Bourgogne ». In : *Innovations Agronomiques* 22, p. 135-157. url : https://hal.inrae.fr/hal-02642483.

Richard, Yves, Nadège Martiny, Mathieu Rouault, Nathalie Philippon, Yann Tracol et Thierry Castel (nov. 2012a). « Multi-month memory effects on early summer vegetative activity in semi-arid South Africa and their spatial heterogeneity. » In : *International Journal of Remote Sensing* 33.21. 20 pages, p. 6763-6782. doi : 10.1080/01431161.2012.692830. url : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00712207.

Xu, Yiwen, Thierry Castel, Yves Richard, Cédric Cuccia et Benjamin Bois (oct. 2012). « Burgundy regional climate change and its potential impact on grapevines. » In : *Climate Dynamics* 39.7-8. 14 pages, p. 1613-1626. doi : 10.1007/s00382-011-1284-x. url : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00750390.

Duc, Gérard et al. (2010). « Potentiels et leviers pour développer la production et l'utilisation des protéagineux dans le cadre d'une agriculture durable en Bourgogne ». In : *Innovations Agronomiques* 11, p. 157-173. url : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01173204.

Roucou, Pascal, Thierry Castel, Nicolas Vigaud, Bernard Fontaine, Yves Richard, Pierre Camberlin et Benjamin Bois (2009). « Régionaliser le climat pour en évaluer les impacts : l'apport des modèles numériques ». In : *Révue annuelle de la recherche, Université de Bourgogne*, p. 122-128. url : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00418633.

Castel, Thierry et Pascal Oettli (2008). « Sensitivity of the C-band SRTM DEM vertical accuracy to terrain characteristics and spatial resolution ». In : *Headway in Spatial Data Handling*. Springer Berlin Heidelberg, p. 163-176. doi : 10.1007/978-3-540-68566-1. url : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00335438.

Picard, Ghislain, Thuy Le Toan, Shaun Quegan, Yves Caraglio et Thierry Castel (août 2004). « Radiative Transfer Modeling of Cross-PolarizedBackscatter From a Pine Forest Using the DiscreteOrdinate and Eigenvalue Method ». In : *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42.8, p. 1720-1730. url : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02154817.

Castel, Thierry, André Beaudoin et Gérard Trouche (2002a). « Analysis of SAR interferometry for tree height estimation over hilly forested area ». In : *Agricultura scientific journal* 1, p. 15-23. url : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02154841.

Castel, Thierry, Francisco Guerra, Yves Caraglio et François Houllier (2002b). « Retrieval biomass of a large Venezuelan pine plantation using JERS-1 SAR data. Analysis of forest structure impact on radar signature ». In : *Remote Sensing of Environment* 79.1, p. 30-41. doi : 10.1016/S0034-4257(01)00236-X. url : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02154826.

Castel, Thierry, André Beaudoin, Nicolas Floury, Thuy Le Toan, Yves Caraglio et Jean-François Barczi (mars 2001a). « Deriving forest canopy parameters for backscatter models using the AMAP architectural plant model ». In : *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39.3, p. 571-583. doi : 10.1109/36.911115. url : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02155457.

Castel, Thierry, André Beaudoin, N. Stach, N. Stussi, Thuy Le Toan et P. Durand (2001b). « Sensitivity of space-borne SAR data to forest parameters over sloping terrain. Theory and experiment ». In : *International Journal of Remote Sensing* 22.12, p. 2351-2376. url : https://hal.inrae.fr/hal-02580259.

Castel, Thierry, Yves Caraglio, André Beaudoin et Frédéric Borne (fév. 2001c). « Using SIR-C SAR Data and the AMAP Model for Forest Attributes Retrieval and 3-D Stand Simulation ». In : *Remote Sensing of Environment* 75.2, p. 279-290. doi : 10.1016/S0034-4257(00)00173-5. url : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02155601.

Castel, Thierry, Jean-Michel Martinez, André Beaudoin, Urs Wegmuller et Tazio Strozzi (juill. 2000b). « ERS INSAR Data for Remote Sensing Hilly Forested Areas ». In : *Remote Sensing of Environment* 73.1, p. 73-86. doi : 10.1016/S0034-4257(00)00083-3. url : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02157510.

E.2 Colloques et congrès internationaux avec actes

Laurent, Léa, Albin Ullmann et Thierry Castel (2023b). « Abrupt late 1980s surface climate warming effects on drought risk over main french crop production basins ». In : *EGU General Assembly, Vienna Austria*. France, 1p.

Blanchet, Valentin, Philippe Amiotte-Suchet, Nathalie Bréda, Vincent V. Badeau et Thierry Castel (juill. 2022). « Apport d'un nouveau protocole de régionalisation dynamique du climat pour l'estimation du bilan hydrique de douglasaies ». In : *35ème colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie*. Météo-France and Université Toulouse III. Toulouse, France. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-03693215.

Laurent, Léa, Albin Ullmann, Claude Perrot, Xavier Aubouy et Thierry Castel (juill. 2022a). « How abrupt change in surface temperature impact water cycle over France ? » In : *35ème colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie*. Toulouse, France, 6p. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-03693204.

Moron, Vincent et al. (juill. 2022). « Evolution de la couverture nuageuse basse de saison sèche sur la façade atlantique de l'Afrique centrale de l'échelle diurne à interannuelle ». In : *35th Annual Conference of the International Association of Climatology (AIC 2022)*. Toulouse, France, p. 6. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-03662771.

Philippon, Nathalie et al. (juill. 2020). « Dyvalocca : un projet pour l'étude des nuages bas de saison sèche sur la façade atlantique de l'Afrique centrale et de leur impact bioclimatique sur les forêts sempervirentes. » In : *33ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Sous la dir. de H. Quenol et V. Bonnardot. Changement climatique et territoires. 5 pages. Rennes, France : Association Internationale de Climatologie, p. 541-545. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02969529.

Gavrilescu, Catinca, Benjamin Bois, Thierry Castel, Annabelle Larmure, M. Ouvrié et Yves Richard (mai 2019a). « Analyse spatiale de l'évolution du risque de gel sur la vigne en Bourgogne-Franche-Comté ». In : *32ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Sous la dir. de C. Anagnostopoulou & P. Maheras K. Tolika. 6 pages. Thessalonique, Greece : Association Internationale de Climatologie, p. 181-186. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02189405.

Gavrilescu, Catinca, Benjamin Bois, Olivier Planchon, Thierry Castel, Annabelle Larmure, M. Ouvrié et Yves Richard (oct. 2019b). « Variabilité des extrêmes thermiques et impacts sur la viticulture : l'évolution du risque de gel de printemps en Bourgogne Franche-Comté. » In : *Rencontres du Clos-Vougeot 2019*. Sous la dir. de J. Pérard & C. Wolikow. Fluctuations climatiques et vignobles. Du Néolithique à l'actuel : impacts, résilience et perspectives. Publication de la Chaire UNESCO "Culture et Traditions du Vin" de l'Université de Bourgogne et du Centre Georges Chevrier UMR CNRS/uB 7366. Vougeot, France : Chaire UNESCO " Culture et Traditions du Vin ", p. 349-357. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02992611.

Castel, Thierry, Christophe Lecomte, Yves Richard, Isabelle Lejeune-Hénaut et Annabelle Larmure (oct. 2018b). « Évolution rétrospective du risque gélif hivernal en climat tempéré suite eu réchauffement climatique. » In : *15èmes Rencontres Bourgogne-Franche-Comté Nature*. T. 29. 10 pages. Saint-Brisson, France, p. 323-332. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02438503.

Richard, Yves, Sandrine Petit, Marie-Hélène Vergote et Thierry Castel (oct. 2018b). « Le changement climatique : où en sommes-nous ? » In : *15èmes Rencontres Bourgogne-Franche-Comté Nature*. T. 29. 7 pages. Saint-Brisson, France, p. 143-149. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02436599.

Zito, Sébastien, Yves Richard, Thierry Castel et Benjamin Bois (oct. 2018b). « Impact du changement climatique sur l'oïdium de la vigne : cas de la Champagne. » In : *15èmes Rencontres Bourgogne-Franche-Comté Nature*. T. 29. 7 pages. Saint-Brisson, France, p. 200-206. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02436672.

Fathalli, Bilel, Thierry Castel, Benjamin Pohl et Mohamed Jomaa Safi (juill. 2017a). « Impacts sur le climat régional induits par l'immersion d'une zone aride : cas de Chott Jérid (sud de la Tunisie). » In : *30ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Sous la dir. de S. Charfi S. Dahech. 6 pages. Sfax, Tunisia : Association Internationale de Climatologie, p. 479-484. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01585084.

— (mars 2015). « Impacts climatiques induits par un lac artificiel : apport de l'analyse spatial sous R ». In : *Conference : First International Congress : ISEE GEOMATICS*. 2 pages. Tataouine, Tunisia, p. 119-120. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02161384.

Joly, Daniel, Thierry Castel, Benjamin Pohl et Yves Richard (juill. 2015). « Résolution spatiale des MNT et qualité de l'estimation des températures et des précipitations en France ». In : *28ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC)*. 6 pages. Liège, Belgium : Association Internationale de Climatologie, p. 49-54. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01300511.

Pauthier, Basile, Benjamin Bois, Thierry Castel, Denis Thévenin et Yves Richard (juill. 2015). « Intercomparaison radar-pluviomètre pour l'estimation des pluies à haute résolution. » In : *28ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Sous la dir. de M. Erpicum. 6 pages. Liège, Belgium : Association Internationale de Climatologie, p. 67-72. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01300533.

Boulard, Damien, Thierry Castel, Pierre Camberlin, A.S. Sergent, N. Breda et Vincent Badeau (juill. 2014). « Apport d'un modèle climatique régional pour l'analyse des contraintes hydriques sur les douglasaies de

Bourgogne. » In : *27ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Sous la dir. de P. Camberlin Richard Y. 7 pages. Dijon, France : Association Internationale de Climatologie, p. 487-493. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01117072.

Brulebois, Etienne, Aurélien Rossi, N. Le Moine, M. Phillipe, Thierry Castel, Yves Richard et Philippe Amiotte-Suchet (juill. 2014). « Potentialités d'une chaîne hydroclimatique à l'échelle des bassins versants bourguignons. » In : *XXVIIème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Sous la dir. de P. Camberlin Richard Y. 7 pages. Dijon, France, p. 23-29. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01114644.

Castel, T., C. Lecomte, Y. Richard, I. Lejeune-Hénaut et A. Larmure (juill. 2014). « Le réchauffement climatique diminue-t-il le risque de dégâts par le gel pour les cultures de climat tempéré ? » In : *27ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Sous la dir. de P. Camberlin & Y. Richard. 7 pages. Dijon, France : Association Internationale de Climatologie, p. 271-277. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01117037.

Castel, Thierry, Christophe Lecomte, Yves Richard, Isabelle I. Lejeune-Henaut et Annabelle Larmure (juill. 2014b). « Le réchauffement climatique diminue-t-il le risque de dégâts par le gel pour les cultures de climat tempéré ? » In : *27ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC)*. XXVIIe colloque de l'Association International de Climatologie. Dijon, France, p. 766-782. URL : https://hal.inrae.fr/hal-02743995.

Fathalli, Bilel, Benjamin Pohl, Thierry Castel et Mohamed Jomaa Safi (juill. 2014a). « Désagrégation dynamique des pluies de la Tunisie par le modèle climatique régional ARW/WRF. » In : *27ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Sous la dir. d'Y. Richard et P. Camberlin. 7 pages. Dijon, France : Association Internationale de Climatologie, p. 494-500. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01117243.

— (juin 2014b). « Evaluation of a surface temperature simulation over Tunisia using the WRF model ». In : *3rd International Lund Regional-Scale Climate Modelling Workshop, 21st Century Challenges in Regional Climate Modelling*. 2 pages. Lund, Sweden, p. 200-201. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02159222.

Legras, Olivier, Marjorie Ubertosi, Etienne Brulebois, Philippe Amiotte-Suchet, Aurélien Rossi, Thierry Castel, Yves Richard, Jean-Marc Brayer, Clément Doney, S. Pinson, P. Sollsteiner et Hélène Toussaint (juill. 2014). « Evolution du bilan hydrique à l'échelle de bassins versants en contexte de changement climatique - Mise place d'une méthodologie. » In : *XXVIIème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Sous la dir. de P. Camberlin & Y. Richard. 6 pages. Dijon, France, p. 454-459. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01114678.

Rossi, Aurélien, Thierry Castel, Yves Richard, Philippe Amiotte-Suchet, Etienne Brulebois, Marjorie Ubertosi, J.-M. Brayer, Clément Doney et H. Toussaint (juill. 2014). « Impact du changement climatique sur l'évolution de la ressource en eau en Bourgogne, France (1980-2100). » In : *XXVIIème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Sous la dir. de P. Camberlin & Y. Richard. 6 pages. Dijon, France, p. 170-175. DOI : 10.13140/2.1.2565.7606. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01114670.

Cuccia, Cédric, Benjamin Bois, Yves Richard, A. Parker, Y. Xu et Thierry Castel (juin 2012). « How climate change will impact terroir potential in the Burgundy vineyards. » In : *9ème Congrès International des Terroirs Vitivinicoles*. 6 pages. Dijon & Reims, France, p. 31-37. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01117904.

Richard, Yves, Pascal Roucou, Julien Crétat, Thierry Castel et Benjamin Pohl (sept. 2012b). « Modèles de climats régionaux : potentiels et limites. » In : *25ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Sous la dir. de S. Bigot & S. Rome. 6 pages. Grenoble, France : Association Internationale de Climatologie, p. 667-672. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00757477.

Bois, Benjamin, Jean-Pierre Chabin, P. Petitot, M. Adrian, Malika Madelin, Hervé Quénol, D. Thévenin, J. Villery, Thierry Castel et Yves Richard (août 2011). « Frost risk spatial analysis and zoning for viticulture at local scale level using digital geographical information data, field information and winegrowers survey. » In : *17th International Symposium GIESCO, 29th August-2nd September 2011*. 17th International Symposium GIESCO, 29th August-2nd September 2011. Asti-Alba (CN), Italy, Italy, 4p. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00694229.

Camberlin, Pierre, Thierry Castel, Yves Richard et David Williamson (sept. 2011). « Montagnes d'Afrique Tropicale : marqueurs de la variabilité climatique ou isolats climatiques ? » In : *Climat montagnard et risques*. Rovereto, Italy, p. 129-134. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00625600.

Cuccia, Cédric, Benjamin Bois, A. Parker, C. Van Leeuwen, Thierry Castel, I. Garcia de Cortazar-Atauri et Yves Richard (août 2011a). « Variability of estimated dates of the occurrence of development stages of pinot noir in burgundy, for current and future climate depending on the phenological model used. » In : *17th International Symposium GIESCO*. 4 pages. Asti-Alba, Italy, p. 1-4. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01117951.

Cuccia, Cédric, Yves Richard, Thierry Castel, Benjamin Bois et Denis Thévenin (sept. 2011b). « Évolution des structures spatiales récurrentes des températures quotidiennes en Bourgogne. » In : *24ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Sous la dir. de M. Fazzini & G. Beltrando. 6 pages. Rovereto, Italy : Association Internationale de Climatologie, p. 153-158. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01116629.

Richard, Yves, Benjamin Bois et Thierry Castel (sept. 2011). « Géostatistique, radio sondages et modèles numériques à aire limitée : données et méthodes croisées pour l'étude d'un événement froid en France. » In : *24ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Sous la dir. de M. Fazzini & G. Beltrando. 6 pages. Rovereto, Italy : Association Internationale de Climatologie, p. 513-518. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01116641.

Castel, Thierry, Yiwen Xu, Yves Richard, Benjamin Pohl, Julien Crétat, Denis Thevenin, Cédric Cuccia, Benjamin Bois et Pascal Roucou (sept. 2010). « Désagrégation dynamique haute résolution spatiale du climat du Centre Est de la France par le modèle climatique régional ARW/WRF ». In : *XXIIIeme colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Rennes, France. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00484826.

Cuccia, Cédric, Yves Richard, Benjamin Bois, Thierry Castel et D. Thevenin (sept. 2010). « Changement climatique : impacts sur la phénologie du Pinot Noir en Bourgogne. » In : *23e Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Sous la dir. de V. Dubreuil, O. Planchon et H. Quenol & V. Bonnardot. 6 pages. Rennes, France : Association Internationale de Climatologie, p. 143-148. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01117979.

Cyril, Bonnefoy, Malika Madelin et Thierry Castel (mars 2009). « Régionalisation d'un indice agro-climatique en Bourgogne ». In : *NOUVELLES APPROCHES EN GEOGRAPHIE THEORIQUE ET QUANTITATIVE*. Besançon, France, 10p. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00418644.

Lamy, Chloé, Philippe Amiotte-Suchet, Thierry Castel, Yves Richard, Marjorie Ubertosi, Arnaud Vautier, Pierre Curmi et Hélène Toussaint (nov. 2009). « Sensibilité de la réserve en eau des sols de Bourgogne pour une année climatique (2003) représentative du climat futur ». In : *TENEUR EN EAU ET TRANSFERTS EN MILIEU POREUX : MESURES ET STATISTIQUES À L'ÉCHELLE STATIONNELLE*. Aix-en-Provence, France, p. 1-10. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00459752.

Ubertosi, Marjorie, Arnaud Vautier, Pierre Curmi, Chloé Lamy, Hélène Toussaint, Thierry Castel, Yves Richard et Amiotte-Suchet Philippe (nov. 2009). « Évaluation de la réserve en eau à l'échelle des pédopaysages de Bourgogne ». In : *TENEUR EN EAU ET TRANSFERTS EN MILIEU POREUX : MESURES ET STATISTIQUES À L'ÉCHELLE STATIONNELLE*. Aix-en-Provence, France, p. 1-10. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00459754.

Castel, Thierry, Jean-Noël Dodane, Jean-Marc Brayer, Pierre Curmi, Francis Andreux et Dominique Peyron (mars 2007). « Spatial analysis of within-vineyard grapevine sensitivity to solar irradiance patterns. A case study using Pinot noir in a complex terrain ». In : *Réchauffement climatique, quels impacts probables sur les vignobles ?* Communication orale, texte intégral. Dijon, France, 9 pages. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01190287.

Houzé, Marie-Laure, Thierry Castel et Yves Richard (jan. 2005a). « Analyse de la répartition spatiale des concentrations d'ozone en Bourgogne ». In : *Théoquant. Septièmes Rencontres 2005*. Sous la dir. de Laboratoire ThéMA Unité Mixte Recherche (UMR de 6049). T. 7. ISSN : 1769-6895 1. Besançon, France, p. 1-10. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00447648.

— (2005b). « Analyse de la répartition spatiale des concentrations d'ozone en Bourgogne : résultats préliminaires ». In : *Actes du XVIIIe Colloque International de Climatologie*. Gênes, Italy, p. 47-50. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00330422.

Richard, Yves, Marie-Laure Houzé et Thierry Castel (jan. 2005). « Performances comparées de données météorologiques issues de modèles et de mesures : application aux prévisions et à l'interpolation de concentrations d'ozone en Bourgogne ». In : *Septièmes rencontres de Théo Quant*. Besançon, France, p. 1-10. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00447532.

Castel, T., F. Guerra, A. Ruiz, V. Albarran, Y. Caraglio et F. Houllier (2000). « Retrieval biomass of a large Venezuelan pine plantation using JERS-1 SAR data ». In : *IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet : The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No.00CH37120)*. T. 1, p. 396-398. DOI : 10.1109/IGARSS.2000.860531.

Castel, Thierry, Aandré Beaudoin, Ghislain Picard, Thuy Le Toan, Yves Caraglio et François Houllier (2000a). « An accurate analysis of L-band SAR backscatter sensitivity to forest biomass ». In : *IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet : The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No.00CH37120)*. T. 6, p. 2564-2566. DOI : 10.1109/IGARSS.2000.859641.

Castagnas, Luce, Nicolas Stussi, André Baudoin, Thierry Castel, Sylvia Sylvander et Patrick Gigord (1997). « Une methode unifiee de correction des images RSO acquises en terrain accidente ». In : *Physical measurements and signatures in remote sensing : proceedings of the Seventh International Symposium on Physical*. International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing ; 7 ; 1997 ; Courchevel, France, p. 35-42. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02157547.

Castel, Thierry, André Beaudoin, J.F. Barczi, Yves Caraglio, N. Floury, Thuy Le Toan et L. Castagnas (1997). « On the coupling of backscatter models with tree growth models : part 1 : a realistic description of the canopy using the AMAP tree growth model ». In : *IGARSS'97 Remote sensing - a scientific vision for sustainable*

development, Singapore, SGP, 3-08 August 1997. Singapore, p. 784-786. URL : https://hal.inrae.fr/hal-02575993.

FLOURY, N., G. PICARD, Thuy LE TOAN, J.A. KONG, Thierry CASTEL, André BEAUDOIN et J.F. BARCZI (1997). « On the coupling of backscatter models with tree growth models :part 2 : RT modelling of forest backscatter ». In : *IGARSS'97 Remote sensing - a scientific vision for sustainable development, Singapore, SGP, 3-08 August 1997*. Singapore, p. 787-789. URL : https://hal.inrae.fr/hal-02575994.

BEAUDOIN, André, Thierry CASTEL, M. DESHAYES, N. STACH, N. STUSSI et Thuy LE TOAN (1996a). « Forest biomass retrieval over hilly terrain from spaceborne SAR data ». In : *CNES symposium extraction de paramètres bio-géophysiques à partir des données RSO pour les applications terrestres, Toulouse, 10-13 octobre 1995*. France, p. 131-140. URL : https://hal.inrae.fr/hal-02575755.

BEAUDOIN, André, Thierry CASTEL, N. STACH, Frederic BORNE, Yves CARAGLIO, D. BARTHÉLÉMY et P. DURAND (1996b). « Coupling of SAR SIR-C data to a tree growth model : retrieval of forest parametres and forest landscape 3D simulation ». In : *9ème congrès de l'association Québécoise de Télédétection : la télédétection au sein de la géomatique, Université de Laval, CAN, 30 avril-3 mai 1996*. Canada, p. 21. URL : https://hal.inrae.fr/hal-02575757.

BEAUDOIN, André, Castel THIERRY et Rabaute THIERRY (sept. 1996c). « Forest monitoring over hilly terrain using ERS INSAR data ». In : *Proceedings of Fringe 96 Workshop : ERS SAR Interferometry*. Zürich, Switzerland : ESA SP-406, p. 105-115.

STUSSI, N., André BEAUDOIN, Thierry CASTEL et Patrick GIGORD (oct. 1995). « Radiometric correction of multi-configuration spaceborne SAR data over hilly terrain ». In : *CNES symposium extraction de paramètres bio-géophysiques à partir des données RSO pour les applications terrestres, Toulouse, 10-13 octobre 1995*. Toulouse, France, p. 457-466. URL : https://hal.inrae.fr/hal-02575756.

E.3 Colloques et congrès internationaux sans actes

LAURENT, Léa, Albin ULLMANN, Claude PERROT, Xavier AUBOUY et Thierry CASTEL (mai 2022b). *How abrupt change in surface temperature impacts water balance over France ? A case-study of bread wheat cultivated areas*. Tours, France. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-03687148.

LARMURE, Annabelle, Jean-Marc BRAYER, Mathieu CHANIS, Eric LUCOT, Jean-Claude MONNET, Thierry CASTEL et Marjorie UBERTOSI (avr. 2021). *Prise en compte des sols pour l'évaluation du potentiel de production d'une légumineuse d'intérêt : le pois*. Congrès IGCS (Inventaire Gestion et Conservation des Sols) 2021. Poster. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-03341955.

LARMURE, Annabelle et Thierry CASTEL (avr. 2021). *Le changement climatique et son impact sur la culture du pois. Emission WebTV Agrosup canal Eduter sur la polyculture-élevage, organisée dans le cadre des projets PSDR Prosys et POEETE. Des experts parlent des "Protéines végétales pour l'homme et l'élevage". 1er avril 2021*. émission télévision internet plus vidéo youtube. URL : https://hal.inrae.fr/hal-03335609.

LAROCHE, Candice, Annabelle LARMURE et Thierry CASTEL (avr. 2021). *Le changement climatique et son impact sur la culture du pois*. WebTV organisée dans le cadre du séminaire final des projets PSDR BFC (projets PSDR ProSys et POEETE), vidéo YouTube. URL : https://hal.inrae.fr/hal-03412901.

CAVAN, Nicolas, Bertrand OMON, Thierry CASTEL, Nathalie COLBACH et Frédérique ANGEVIN (jan. 2019). *Évaluation par simulation des performances et de la durabilité de systèmes de culture innovants pour la gestion durable des adventices : exemple d'un groupe DEPHY Ferme de l'Eure*. Paris, France. URL : https://hal.inrae.fr/hal-02736207.

CASTEL, Thierry, Christophe LECOMTE, Yves RICHARD et Annabelle LARMURE (oct. 2018a). *Evolution rétrospective du risque gélif hivernal en climat tempéré suite au réchauffement climatique*. Saint Brisson, France. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02158485.

CASTEL, Thierry, Antoine MIGEON, Didier REBEIX et Julien PERGAUD (oct. 2018c). *Régionalisation dynamique fine résolution du climat de l'Europe de l'ouest*. Lyon, France : École normale supérieure de Lyon. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02157657.

CASTEL, Thierry et Yves RICHARD (oct. 2018). *Changement climatique en Bourgogne et ses impacts sur la ressource en eau*. Nuits-Saints-Georges, France : Direction régionale de l'ADEME and Région Bourgogne-Franche-Comté. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02157681.

BRULEBOIS, Etienne, Marjorie UBERTOSI, Thierry CASTEL, Yves RICHARD et Amiotte-Suchet PHILIPPE (jan. 2017b). *Aptitude d'une chaîne de modélisation hydroclimatique à évaluer les impacts de changements d'occupation du sol à l'échelle de 3 bassins versants bourguignons sur la période 1980-2100*. St-Michel l'Observatoire, France : Groupe Francophone Humidimétrie et TraNsferts en Milieux Poreux and ECosystèmes COntinentaux et Risques EnVironnementaux and Institut Méditerranéen de la Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale and Observatoire de Haute-Provence. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-01788966.

CASTEL, Thierry, Christophe LECOMTE, Y. RICHARD et Annabelle LARMURE (mars 2017a). *Modelling the regional evolution of frost damage on a winter crop with warming in a temperate climate*. 2. Agriculture and Climate Change Conference. Poster. Elsevier. USA. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01608671.

Fathalli, Bilel, Benjamin Pohl, Thierry Castel et Mohamed Jomaa Safi (oct. 2017b). *Régionalisation des pluies en Tunisie : Apport des simulations Euro-CORDEX*. Hammamet, Tunisia. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02161353.

Brulebois, Etienne, Marjorie Ubertosi, Aurélien Rossi, Thierry Castel, Yves Richard, Sabine Sauvage, José Miguel Sánchez-Pérez et Philippe Amiotte-Suchet (juin 2015b). *Sensitivity of water quality of three contrasted north-eastern French watersheds to climate change (2006-2100) using SWAT model*. Pula, Italy. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-01789066.

Lecomte, Christophe, Benoit Carroué, Véronique Biarnès, Eric Hanocq, Annabelle Larmure et Thierry Castel (jan. 2015). *Nouveautés variétales de Pois Hr, adaptation au changement climatique*. Chalon-sur-Saône, France. URL : https://hal.inrae.fr/hal-02743637.

Pohl, Benjamin, Yves Richard, Manon Kohler, Justin Emery, Thierry Castel, Benjamin De Lapparent, Justine Roux, O. Codet-Hache, Sophie Bientz, Franck Dumaitre, Hélène Toussaint, Anne-Cerise Tissot, Denis Thevenin et Thomas Thévenin (jan. 2015a). *L'Ilot de Chaleur Urbain de l'agglomération dijonnaise : campagne instrumentale in situ et modélisation climatique régionale haute résolution*. Toulouse, France. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02159119.

Pohl, Benjamin, Yves Richard, Manon Kohler, Justin Emery, Thierry Castel, Benjamin De Lapparent, Denis Thevenin, Thomas Thévenin et Julien Pergaud (juill. 2015b). *The Urban Heat Island of a middle-size French city as seen by high-resolution numerical experiments and in situ measurements the case of Dijon, Burgundy*. Toulouse, France. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02158987.

Castel, Thierry, Annabelle Larmure et Yves Richard (oct. 2014a). *Risques gélifs sur grandes cultures dans un contexte de changement climatique*. Dijon, France. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02158041.

Bois, Benjamin, Yves Richard, Thierry Castel et Cédric Cuccia (nov. 2013). *L' évolution globale du climat, déclinaison en Bourgogne*. Beaune, France. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02161435.

Pohl, Benjamin et Thierry Castel (mars 2013). *Gestion et manipulation des données en climatologie*. Besançon, France. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02162265.

Richard, Yves et Thierry Castel (août 2013). *L'évolution du climat en Bourgogne*. Château-Chinon, France. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02158446.

Boulard, Damien et Thierry Castel (mai 2012). *Projecting the Regional Climate Change for East-Central France : potential impacts on Burgundy forests*. Conférence internationale "Faire face au changement climatique : la contribution de la science forestière". Poster. DOI : 10.13140/RG.2.2.33370.13763. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02166656.

Duc, Gérard et al. (juin 2012). *Potentiels et verrous d'une filière protéagineuse pour une agriculture durable en Bourgogne*. Clermont Ferrand, France. URL : https://hal.inrae.fr/hal-02810975.

Doll, David, Thierry Castel, Nadège Martiny, Yves Richard et Denis Thévenin (sept. 2010). *Vulnérabilité des forêts de douglas du Morvan face au changement climatique : l'expérience de 2003*. Rennes, France. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00448027.

Richard, Yves, Benjamin Bois, Thierry Castel, Cédric Cussia, Marie-Cécile Deconninck, David Doll, Christophe Lecomte, Christine Monamy, Denis Thevenin, Julien Villery et Ywen Ywen Xu (mars 2010a). *Le changement climatique en Bourgogne : observations, simulations et impacts*. Dijon, France. URL : https://hal.inrae.fr/hal-02758230.

Richard, Yves, Thierry Castel, Cédric Cuccia, Benjamin Bois, Chloé Lamy et Denis Thévenin (sept. 2010b). *Configurations spatio-temporelles des températures et des précipitations au printemps et en été 2003 en Bourgogne : mesures Météo France et simulations WRF*. Rennes, France. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00448025.

Richard, Yves, Nadège Martiny, Mathieu Rouault et Thierry Castel (jan. 2010c). *Végétation de début de saison en Afrique du Sud semi aride : effets mémoires et conditions environnementales*. Clermont Ferrand, France. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00448013.

Lamy, C., M. Ubertosi, P. Curmi, A. Vautier, T. Castel, H. Toussaint et P. Amiotte-Suchet (nov. 2009). *Evaluation de la réserve en eau à l'échelle des pédopaysages de Bourgogne*. Marseille, France. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00418649.

Toussaint, Hélène, Amiotte-Suchet Philippe, Thierry Castel, Pierre Curmi, Chloé Lamy, Sandrine Petit, Yves Richard, Marjorie Ubertosi et Arnaud Vautier (déc. 2009). *L'adaptation au changement climatique en Bourgogne. une approche partenariale et pluridisciplinaire*. Paris-Nord Villepinte, France. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00459755.

Peyron, D., J.-N. Dodane, J.-M. Brayer, Pierre Curmi, Thierry Castel et F. Andreux (2007). *Influence de l'environnement d'un bois de pins sur la maturité des baies de pinot noir sur une parcelle viticole situee en côte de Nuits" in Global warming, which potential impacts on the vineyards ?* URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00172481.

Richard, Yves, Marie-Laure Houzé et Thierry Castel (2007). *Performances comparées de données météorologiques issues de modèles et de mesures : application aux prévisions et à l'interpolation des concentrations d'ozone en Bourgogne*. url : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00172490.

Martiny, Nadège, Yves Richard, Romain Marteau, Pascal Oettli, Pierre Camberlin et Thierry Castel (2006). *What controls the early summer greenness in semi-arid South Africa ?* Bloemfontain, South Africa. url : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00095149.

Castel, Thierry (nov. 2003). *Simulation des sorties d'eau et de nitrates de parcelles agricoles drainées. Cas du site expérimental de Virey-le-Grand (71)*. Dijon, France. url : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00221504.

Castel, Thierry, Barczi Jean-François, Caraglio Yves et Houllier François (août 2002c). *AMAP2SAR : a simulation software for 3D characterization of plant canopy*. Edinburgh, Scotland.

Castel, Thierry (mai 1999). *Estimation de la ressource forestière par télédétection radar*. Ottawa, Canada. url : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02158459.

Beaudoin, André, Martinez Jean-Michel, Castel Thierry, Hallikainen M, Makynen M, Uusitalo J et Floury Nicolas (juill. 1998). *Preliminary analysis of HUTSCAT data over Austrian pine plantations in relation with tree parameters and architecture*. Nantes, France.

Beaudoin, andré, Castel Thierry, Le Toan Thuy, Floury Nicolas et Caraglio Yves (mars 1998). *Estimation de la biomasse par télédétection radar : apport du couplage d'un modèle théorique de rétrodiffusion à un modèle architectural de croissance d'arbres, Atelier International changement d'échelle et modélisation en foresterie : apport de la télédétection et des SIG*. Montréal, Canada.

Nicolas, Floury, Le Toan Thuy, Castel Thierry, Beaudoin André et Caraglio Yves (juill. 1998). *Radar backscatter modeling of forests using a rafined architecture tree model*. Nantes, France.

Thierry, Castel et Floury Nicolas (mars 1998). *Modélisation radar des milieux forestiers : couplage d'un modèle architectural de plantes avec un modèle de diffusion électromagnétique*. Toulouse.

Beaudoin, André, Castel Thierry, Stach Nicolas, Borne Frédéric, Caraglio Yves, Barthélémy Daniel et Durand Philippe (sept. 1997a). *Estimation of a vegetation coverage with a vegetal growth model (AMAP), driven with GIS/Remote Sensing data*. Université Paris IX - Dauphine, LISE - CEREMADE.

Beaudoin, André, Le Toan Thuy, Castel Thierry, Floury Nicolas et Yves (déc. 1997b). *Towards retrieval of forest parameters over hilly terrain using SAR data*. Ottawa, Canada.

Beaudoin, andré, Borne Frédéric, Castel Thierry, Caraglio Yves, Barthélémy Daniel, Jean-François Barczi, Stach Nicolas et Durand Philippe (juill. 1996a). *A methodology for GIS -Based 3D simulation of forested hilly landscape, using SIR -C SAR data coupled to the AMAP tree growth model*. Innsbruck, Austria.

Beaudoin, andré, Castel Thierry, Stach Nicolas, Borne Frédéric, Caraglio Yves, Barthéllémy Daniel et Durand Philippe (mai 1996b). *Couplage de données radar SIR-C à un modèle architectural de croissance des arbres : évaluation de paramètres forestiers sur la maquette et la simulation 3D d'un paysage*. Québec, Canada.

Beaudoin, andré, Castel Thierry et Rabaute Thierry (juill. 1996c). *Potential of ERS1/2 Insar Data for forest monitoring over hilly terrain : case study on Austrian pine plantations*. Innsbruck, Austria.

Castel, Thierry, Beaudoin André, Stach Nicolas, Jean-Claude Souyris et Le Toan Thuy (juill. 1996a). *Sensitivity of polarimetric SIR -C SAR data to forest parameters over hilly terrain : a case study on Austrian pine*. Innsbruck, Austria.

Castel, Thierry, Beaudoin André, Stach Nicolas, Caraglio Yves, Borne Frédéric, Barthélémy Daniel, Barczi Jean-François et Durand Philippe (nov. 1996b). *Apport de l'imagerie satellitaire radar et du modèle architectural de croissance d'arbres AMAP pour le suivi de la biomasse forestière*. ENGREF Montpellier, France.

E.4 Chapitres d'ouvrages

Castel, Thierry (2022). « Un gel plus fréquent, paradoxe du réchauffement ». In : *Bourgogne Franche-Comté Nature Editeur, hors-serie 19*. Saint-Brisson, France, pp 156.

Fabre, Eric et Thierry Castel (mai 2014). « Comment mieux expliquer la nuisance lupine en Provence au XIXe siècle ? L'apport de l'analyse spatiale. » In : *Vivre avec le loup ? 3000 ans de conflit*. Sous la dir. de J.-M. Moriceau. 10 pages. Tallandier, p. 379-388. url : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01117299.

Castel, Thierry (2009). « Apport des Systèmes d'Information Géographique pour l'analyse spatiale des problématiques agri-environnementales ». In : *Manuel Pédagogique Tempus, France-Ukraine*, 5P. url : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00418638.

Castel, Thierry, Beaudoin André, Floury Nicolas, Le Toan Thuy, Caraglio Yves et Barczi Jean-François (1999). « Estimation de la ressource forestière par télédétection radar : apport du couplage d'un modèle architectural de plantes avec un modèle théorique de rétrodiffusion ». In : *Geomatic, optical and radar remote sensing for the management of environmental problems, A. Bannari Editor*. Ottawa, Canada, p. 127-144.

E.5 Rapports et mémoires

Prudhon, Marie, Thierry Castel, Christophe Lecomte, Yves Richard, Veronique Biarnes, Mathieu Chanis, Etienne Brulebois et Annabelle Larmure (2020). *Pourquoi le stress gel hivernal ne disparaît pas chez le pois*

dans un climat qui se réchauffe ? Comment s'y adapter ? Projet PSDR ProSys, Bourgogne-Franche-Comté, p. 8. URL : https://hal.inrae.fr/hal-03563215.

GAVRILESCU, Catinca, Marc OUVRIÉ, Yves RICHARD, Annabelle LARMURE, Thierry CASTEL et Benjamin BOIS (oct. 2018). *Assistance à maîtrise d'ouvrage en vue d'étudier la faisabilité d'un dispositif d'aide à l'investissement pour des équipements de protection contre les dégâts de gel en agriculture en Bourgogne-Franche-Comté*, p. 209.

BRULEBOIS, Etienne, Yves RICHARD et Thierry CASTEL (juill. 2017a). *Modalités et robustesse de la régionalisation du climat de la Bourgogne Franche-Comté*, p. 10. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02166856.

TISSOT, Anne-Cerise, Philippe AMIOTTE-SUCHET, Etienne BRULEBOIS, Thierry CASTEL, Vivien PONNOU-DELAFFON, Yves RICHARD, Jean-Marc BRAYER, Marjorie UBERTOSI, Elsa MARTIN, Sandrine PETIT, Marie-Hélène VERGOTE, Clément DONEY, Stephanie PINSON, Philippe STOLLSTEINER et François BERTRAND (avr. 2016). *Hydrologie, Changement Climatique, Adaptation, Ressource en Eau en Bourgogne : rapport final du projet HYCCARE Bourgogne*, p. 115. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02166915.

CANEILL, Jacques et Thierry CASTEL (2004). *Analyse de la qualité des jus de betterave au cours des campagnes 1996 à 2003, Rapport Final, Sucrerie Souppes-sur-Loing*, p. 66.

CASTEL, Thierry (juill. 2000). *Évaluation de plantations industrielles de pins des Caraïbes au Venezuela par imagerie satellitale radar et modélisation architecturale du couvert forestier : vers l'estimation fine et spatialisée de la ressource forestière*, p. 71. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02454422.

BEAUDOIN, André, Nicolas STUSSI, Sylvie SYLVANDER, Luce CASTAGNAS, Thierry CASTEL, Jean-Marie NICOLAS et Jean-Pierre DEDIEU (1999). *Généralisation et validation d'une méthode de correction radiométrique des images radar satellitales acquises en terrain accidenté : rapport final convention CNES 95-CNES-0440*, p. 57. URL : https://hal.inrae.fr/hal-02578653.

CASTEL, Thierry (juin 1998). *Retrieval of forest biomass from spaceborne synthetic aperture radar data : on the coupling of an architectural plants model with an electromagnetic model*, p. 250. URL : https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/tel-02152966.

BARCZI, Jean-François, Yves CARAGLIO, Hervé REY, Sylvain CHETAILLE, Alexandre BEAUDOIN, Thierry CASTEL et Luce CASTAGNAS (mai 1997). *AMAP2SAR AMAP SORTER V1.0 : user manual*, p. 74. URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02930800.

BEAUDOIN, André et Thierry CASTEL (1996). *Apport des données SIR-C -X -SAR pour le suivi de la ressource forestière (phase 2)*, p. 53. URL : https://hal.inrae.fr/hal-02575758.

BEAUDOIN, André, Thierry CASTEL et Thierry RABAUTE (1995). *Apport des produits interférométriques ERS à des fins d'inventaire forestier, Rapport final, convention CNES 94/CNES/0239*, p. 40.

BEAUDOIN, André, Michel DESHAYES et Thierry CASTEL (1994). *Apport des données SAR multi-fréquence polarimétrique (SIR-C - X-SAR) pour le suivi de la ressource forestière (cartographie des peuplements et estimation des paramètres de la ressource). Rapport final expérimentation SIR-C - X-SAR*, p. 33. URL : https://hal.inrae.fr/hal-02603229.

CASTEL, Thierry (sept. 1992). *Recherches méthodologiques sur le repérage des déficits hydriques par télédétection. Essai d'application sur le tournesol (Hélianthus annuus L. cv viki), DEA*, Université Paul Sabatier -Toulouse III, 63p.